R. WIGAND
H. GROSSMANN

RADIOTECNICA

PARTE II

CONCETTI FONDAMENTALI

II°

EDITRICE MILANO

RADIOTECNICA

2003

ROLF WIGAND

H. GROSSMANN

RADIOTECNICA

Parte seconda

CONCETTI FONDAMENTALI

II°

EDITRICE IL ROSTRO MILANO

1958

Titolo originale dell'opera
RUNDFUNKTECHNIK
Einführung und praktischer Wegweiser
Grundlagen Teil II
ALBRECHT PHILLER - VERLAG, MINDEN (WESTF)

Traduzione di **Giuseppe Baldan**

Tutti i diritti riservati alla
Editrice il Rostro

Tipografia Edizioni Tecniche - Via Baldo Degli Ubaldi, 6 - Milano

INDICE

Pag.

Prefazione

1) Oscillazioni sonore - Oscillazioni elettriche - Microfoni . 1
2) Oscillazioni elettriche - Oscillazioni sonore 7
3) Macchine generatrici di corrente elettrica 10
4) Trasformatori 14
5) La trasformazione della resistenza 18
6) I vibratori 20
7) L'autoinduzione 21
8) Bobine di autoinduzione e trasformatori della radiotecnica 22
9) L'induttanza è molto simile all'inerzia 25
10) Resistenze, condensatori e induttanze nei circuiti in corrente alternata 30
11) Il calcolo vettoriale dei circuiti in corrente alternata - Circuiti oscillanti e loro caratteristiche 37
12) Il circuito risonante oscilla 49
13) La selettività 52
14) Un filo rettilineo come circuito oscillante 56

L'opera completa comprende:

1. Concetti fondamentali I . . . . . N. 2001
2. Concetti fondamentali II . . . . . N. 2003
3. Antenne, onde, raddrizzatori . . . . . N. 2005
4. Amplificatori per alta e bassa frequenza . . . . . N. 2007
5. Controreazione - Trasmettitori e ricevitori moderni . N. 2009

Per la consultazione

Alla fine del quinto opuscoletto di questa serie esiste un indice analitico di tutta la materia trattata. Esso è molto utile per la consultazione.

PREMESSA

La tecnica delle radiocomunicazioni intesa come campo particolare della tecnica delle telecomunicazioni elettriche abbraccia quasi tutti i fenomeni elettrici. Perciò chi vuole avere un sicuro successo nella radiotecnica, deve prima comprendere e conoscere i principi fondamentali. dell'elettrotecnica. Solo basandosi su queste conoscenze indispensabili gli sarà più facile la trattazione anche delle questioni più complicate.

E' con questa convinzione che l'autore si è assunto il compito di famigliarizzare il lettore dapprima con i principi fondamentali dell'elettrotecnica e di spiegarli i molti termini che gli sarà dato di incontrare via via anche nella vita di ogni giorno e poi di accompagnarlo nell'esteso e multiforme campo della radiotecnica. La trattazione della materia è stata svolta tenendo presente che si dovevano evitare delle esposizioni troppo aride per non annoiare il lettore e che si dovevano introdurre fra gli argomenti teorici anche dei capitoli pratici per tenere sempre vivo il collegamento con la realtà.

Rolf Wigand

Oscillazioni sonore - Oscillazioni elettriche
Microfoni

Se si batte sulla pelle di un tamburo essa si mette a vibrare e fa vibrare anche l'aria circostante: le oscillazioni si propagano nell'ambiente in ogni direzione. Le oscillazioni sonore si hanno quindi, quando una sorgente sonora comprime alternativamente l'aria. Queste variazioni di pressione dell'aria arrivano al timpano del nostro orecchio che le trasmette attraverso un complicato meccanismo ai nervi dell'udito.

Se si infila la spina di una lampada da tavolo nella sua presa in modo instabile, si vedrà che gli scuotimenti possono accendere e spegnere alternativamente la lampada. Lo stesso capita con una lampadina che non sia avvitata a fondo sul suo portalampade. In tutti e due i casi si è in presenza di un contatto incerto, oscillante, inserito nel circuito elettrico. Normalmente questo è un disturbo non desiderato e si cerca la possibilità di eliminarlo. C'è però una ecceziene a queste regole: il microfono a carbone, che un ingegnere ha definito scherzosamente « basato sul principio del contatto incerto».

Riempiamo una scatoletta metallica con tanti granuli di carbone (polverina di carbone) e chiudiamo questa scatoletta ben piena con una lamina sottile ed isolata rispetto ad essa, che porta una membrana metallica o di carbone in contatto con i granuli di carbone. Facciamo passare attraverso questa scatola e ad una resistenza (R in fig. 1) una corrente prelevata da una batteria B. L'intensità di questa corrente dipenderà dalla resistenza di passaggio fra i contatti dei vari granuli di carbone e fra i granuli e la membrana o la scatola metallica.

Se si comprime la membrana, la resistenza dei numerosi « contatti incerti » diminuisce quindi varia l'intensità della corrente elettrica ed anche la tensione che si trova ai capi della resistenza. In pratica le oscillazioni sonore che arrivano sulla membrana la pongono in vibrazione e provocano quindi una variazione della resistenza interna nello stesso ritmo delle onde sonore. Varia quindi, secondo la legge di Ohm, anche la corrente che passa attraverso questo circuito. Esso

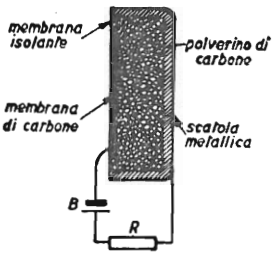


Fig. 1

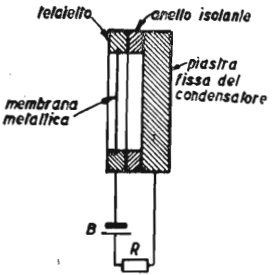


Fig. 2

viene chiamato « *microfono* » e più precisamente microfono a carbone o a contatto e rappresenta il primo tipo di microfono costruito. Esso provoca una corrente continua pulsante, la cui parte « alternata » che rappresenta l'« immagine elettrica » delle onde sonore può essere separata ed ulteriormente amplificata. Un microfono è quindi un trasduttore che trasforma le oscillazioni sonore in oscillazioni elettriche.Ci sono molti tipi di microfoni, basati su principi diversi e che servono per scopi diversi, secondo le loro caratteristiche. Infatti non tutti i microfoni sono capaci di riprodurre fedelmente tutto il campo delle frequenze udibili in modo che nella ritrasformazione delle onde elettriche in onde sonore non si abbia alcuna deformazione. Si dice che un buon microfono non deve avere « distorsione ».

Questa esigenza è soddisfatta solo se il microfono permette una riproduzione fedele nel campo di frequenza da 10 a 1000 Hz.

Il grado di distorsione ammesso per un buon microfono è di ± 3 decibel (dB) per un campo di frequenza da 50 a 5000 Hz. Inoltre un buon microfono deve avere una « soglia di eccitazione » possibilmente bassa, deve cioè permettere la riproduzione anche di suoni con intensità molto bassa.

Questa soglia di eccitazione è determinata dai rumori di disturbo propri, cioè dal rapporto fra la tensione di rumore e la tensione utile. La cosidetta « caratteristica direzionale » di un microfono mostra invece l'intensità con cui viene riprodotto un suono in funzione della direzione di arrivo. In molti casi si desidera una superficie caratteristica sferica: cioè che il suono venga sempre riprodotto allo stesso modo indipendentemente dalla direzione d'arrivo.

I buoni microfoni soddisfano tutte queste esigenze e quindi noi siamo ora in grado di valutare un microfono.

I microfoni vengono distinti secondo il loro principio di funzionamento o della loro forma costruttiva nei seguenti tipi:

1. Microfoni a contatto, ai quali appartiene anche il microfono a carbone.
2. Microfoni a condensatore (o elettrostatici).
3. Microfoni a cristallo (o piezoelettrici).
4. Microfoni dinamici (o magnetici).

Il microfono a carbone è il tipo più vecchio, è però anche il tipo che ha la peggiore caratteristica di riproduzione.

Per la sua forma costruttiva ha un rumore proprio molto alto che peggiora molto il rapporto tensione utile-tensione di disturbo. Il campo di frequenza trasmesso è molto stretto (80 - 2000 Hz), in modo che esso è adatto solo per la voce, ed infatti il suo impiego è limitato quasi esclusivamente alle

applicazioni telefoniche. E' da ricordare un'altro suo svantaggio: esso ha bisogno di una alimentazione in corrente continua; nei microfoni con una resistenza di 50 - 100 Ω e con una tensione di alimentazione di 4 - 8 V passa a riposo una corrente di circa 80 mA. Vantaggiosa è invece la sua alta tensione alternata (0,01 - 0,04 V) che può essere utilizzata direttamente senza alcuna amplificazione.

Se si collegano attraverso una resistenza *R* ad una batteria *B* le due armature di un condensatore (fig. 2), una delle quali sia costituita da una piastra fissa e l'altra da una sottile membrana metallica isolata dalla prima, non passerà alcuna corrente continua, perchè l'isolamento del condensatore è un ostacolo insuperabile. La batteria si limita a caricare il condensatore all'atto dell'inserzione con una quantità di elettricità corrispondente alla sua capacità.

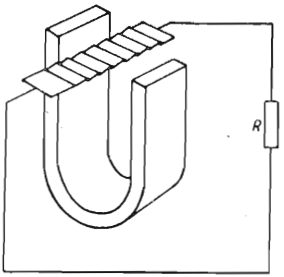


Fig. 3

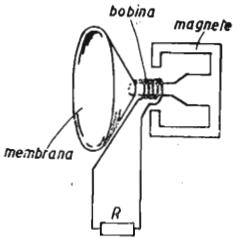


Fig. 4

Se si preme la membrana, essa si avvicina alla piastra fissa, la capacità del condensatore aumenta e percio la batteria deve fornire dell'altra carica al condensatore. Se si lascia libera la membrana, la capacità assume il valore di partenza e la carica sovrabbondante deve ritornare dal condensatore alla batteria. Se si solleva la membrana, cioè se la si

piega verso l'esterno, la capacità diventa meno ancora e dell'altra carica deve passare dal condensatore alla batteria. Se poi la membrana torna nella posizione di partenza, la carica torna a passare ancora dalla batteria al condensatore. Se si sottopone la membrana all'azione delle vibrazioni sonore essa si mette pure in vibrazione e varia la capacità nel ritmo degli aumenti e delle diminuzioni di pressione dell'aria in modo che il condensatore riceve e cede alternativamente dell'elettricità. Questa corrente alternata passa attraverso la resistenza R e provoca in essa una tensione fonica.

Questo dispositivo è il « *microfono a condensatore* ».

Il microfono a condensatore è molto più adatto del microfono a carbone per le trasmissioni di alta qualità, perchè la sua curva di frequenza è praticamente rettilinea da 30 a 10.000 Hz, però, poichè la tensione generata è molto piccola, ha sempre bisogno di una grande amplificazione successiva.

E' molto geniale l'idea di montare il microfono, l'amplificatore e l'alimentatore in un unico complesso.

Un'altro principio per la trasformazione delle vibrazioni sonore in vibrazioni elettriche è utilizzato nel cosidetto « *microfono piezoelettrico* ».

Si è trovato che delle piastrine con due facce parallele, ricavate da certi cristalli (quarzo, tormalina, sale di Seignette) tagliandole in una direzione determinata rispetto all'asse cristallografico, si elettrizzano sulle due superfici quando vengono deformate meccanicamente, cioè si genera una tensione elettrica fra due piastrine metalliche appoggiate sulle due facce (*effetto piezoelettrico*). Questo effetto è sfruttato nel rudimentale esempio della fig. 5. Le onde sonore in arrivo deformano la piastrina di cristallo e sulle piastrine metalliche (fogli sottilissimi) si genera una f.e.m.

I microfoni a cristallo per merito del loro basso costo e della loro alta qualità hanno limitato l'impiego del microfono a carbone al solo campo della telefonia. Il campo di fre-

quenza nei buoni microfoni a cristallo può andare da 40 a 8000 Hz.

Ultimamente hanno trovato un impiego sempre più largo i microfoni dinamici che si distinguono in microfoni a piastrina e a bobina immersa.

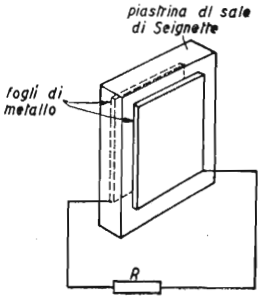


Fig. 5

Se si muove un filo, una bobina, o in generale un conduttore in un campo magnetico oppure se si sposta rispetto ad esso il campo magnetico, si induce nel conduttore una f.e.m. Se dunque si tende fra i poli di un magnete una sottile piastrina metallica (ondulata per aumentarne la resistenza), si induce in essa una f.e.m. alternata che fa passare una corrente attraverso alla resistenza *R* ai capi della quale si troverà una tensione fonica, non appena la lamina di questo «*microfono a piastrina*» viene messa in vibrazione dalle oscillazioni sonore.

La tensione fonica che si ottiene è molto piccola per cui è necessaria una alta amplificazione successiva in più stadi.

Nei microfoni a bobina immersa si usa la disposizione della fig. 4 in cui una bobina ad anello fissata ad una membrana viene a trovarsi fra i poli di un potente magnete per-

manente. Questa è praticamente l'inversione dell'altoparlante elettromagnetico del quale parleremo più avanti. I microfoni a bobina immersa hanno trovato un largo impiego a causa della loro sensibilità e della loro robustezza. Essi non hanno bisogno di una batteria ed hanno una caratteristica particolarmente rettilinea da 50 a 8000 Hz. La tensione fonica fornita è di circa 0,002 V = 2 mV.

Oscillazioni elettriche - Oscillazioni sonore

Per rendere ancora udibile il suono trasformato in oscillazioni elettriche dal microfono si possono impiegare dei sistemi diversi. Il sistema più vecchio è quello ancor oggi molto usato della cuffia e dell'altoparlante elettromagnetici, nei quali la ritrasformazione avviene per via elettromagnetica.

La forma costruttiva è quella della fig. 6. Sulle due estremità di un magnete permanente (davanti alle quali si trova

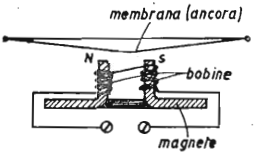


Fig. 6

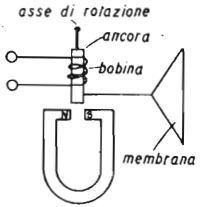


Fig. 7

una membrana di ferro) sono avvolte due bobinette nelle quali si deve far passare la corrente fonica fornita dal microfono. In assenza di corrente la membrana è attirata

dal flusso del magnete permanente. Queste condizioni variano quando le bobine sono percorse da corrente, perchè il flusso da esse prodotto può rinforzare o indebolire il flusso già presente e quindi può fare attirare di più o di meno la membrana, secondo il senso in cui la corrente percorre le bobine. Se esse sono percorse da corrente alternata si mette in vibrazione la membrana e quindi anche l'aria circostante. In un moderno tipo di « *altoparlante magnetico* » il cosidetto « *altoparlante magnetico ad oscillazione libera* » (fig. 7) la bobina viene avvolta attorno ad un'ancora di ferro che si trova di fronte ai poli del magnete e che è collegata alla membrana dell'altoparlante. Poichè l'estremità dell'ancora vicina al magnete diventa alternativamente un polo positivo o negativo secondo la direzione della corrente, essa sarà attirata da una parte o dall'altra e porrà in vibrazione l'ancora. In condizioni di riposo una molla serve a mantenere l'ancora nella mezzeria fra i due poli del magnete.

Gli altoparlanti magnetici a causa della loro caratteristica di essere indipendenti alla frequenza e all'ampiezza vengono impiegati solo raramente.

Il magnete e la bobina possono essere disposti anche in modo che il magnete sia fisso e che la bobina sia mobile, allora è la bobina stessa che si mette ad oscillare nel campo magnetico non appena è percorsa da corrente alternata.

Dapprima venne impiegato un sistema simile a quello della fig. 3 il cosidetto « *altoparlante a lastrina* » (al posto della resistenza *R* si deve mettere una sorgente di corrente alternata), oggi s'impiega invece l'altoparlante con membrana a forma di cono secondo la fig. 4 (*altoparlante dinamico*). Un sistema speciale provvede, come nei microfoni dinamici, che la bobina non urti contro il magnete e che essa torni sempre nella posizione di riposo. Secondo che s'impieghi un magnete permanente o un elettromagnete si parla di « *altoparlanti dinamici a magnete permanente* » o di « *altoparlanti elettrodinamici* ».

Lo sviluppo maggiore l'hanno avuto gli altoparlanti a magnete permanente perchè utilizzano per l'eccitazione un magnete permanente e non hanno bisogno di una sorgente di corrente ausiliaria per creare il campo magnetico. Il principio dell'altoparlante dinamico si può spiegare osservando la fig. 4. Il magnete permanente ha generalmente la forma a mantello (conchiglia) con il nucleo centrale di forma cilindrica. L'orlo della conchiglia e il nucleo centrale si avvicinano e formano uno stretto interferro di forma circolare nel quale si ha un forte campo magnetico (10.000 gauss) ed in cui può liberamente oscillare la bobina percorsa dalla corrente fonica alternata. La membrana a forma di cono collegata con la bobina mobile riceve il movimento dalla bobina stessa e pone in vibrazione l'aria.

Gli altoparlanti dinamici hanno parecchi vantaggi rispetto ai sistemi magnetici e in particolare un maggiore rendimento, cioè un maggiore rapporto fra l'energia sonora irradiata e l'energia elettrica ricevuta. Inoltre anche la riproduzione del suono è notevolmente migliorata nonostante che per ottenere degli ottimi risultati occorra impiegare delle combinazioni di altoparlanti con diverse misure della membrana. Con una membrana di diametro elevato si favoriscono più le note basse e meno le note alte. Normalmente per ottenere una riproduzione fedele da 30 a 8000 Hz basta impiegare una combinazione di un sistema per le note medie con uno per le note basse.

Per determinare la grandezza di un altoparlante si fissa la sua potenza sonora che è uguale alla potenza della corrente alternata che esso può assorbire senza provocare distorsioni.

Al campo dei microfoni e degli altoparlanti appartengono anche i pick-up fonografici e le teste d'incisione della tecnica dei dischi fonografici, nei quali la puntina per suonare i dischi sostituisce la membrana del microfono oppure l'ago per l'incisione di dischi sostituisce la membrana dell'altoparlante.

Ci sono dei pick-up magnetici, dinamici e a cristallo, in questi ultimi la puntina piega la piastrina di quarzo che è incastrata con una sua estremità. Nel caso della registrazione s'impiegano praticamente solo dei sistemi magnetici e dinamici.

Macchine generatrici di corrente elettrica

Il carbone è « energia solare immagazzinata ». Se si brucia del carbone si può fare evaporare dell'acqua e con il vapore prodotto si può azionare una macchina a vapore o una turbina a vapore. Se sull'asse di questa turbina si monta una spira come quella della fig. 8, durante la rotazione s'introduce

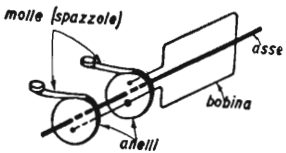


Fig. 8

in essa una f.e.m. e precisamente una f.e.m. alternata, perchè la bobina taglia continuamente delle linee di forza.

Se si vuole utilizzare questa f.e.m. in un circuito elettrico, basta solo collegare i capi della bobina a due anelli metallici isolati rispetto all'asse e fare scorrere su questi anelli, isolati uno rispetto all'altro, due molle (« *spazzole* »).

Questo è un generatore di corrente alternata. Il sistema della turbina a vapore può naturalmente essere sostituito da un'altro qualsiasi, per esempio da una turbina idraulica (cascata), ecc.

Se non si desidera una corrente alternata ma una corrente che abbia sempre la stessa direzione (continua) si deve montare sull'asse il « *commutatore* », le cui « *lamelle* » isolate fra loro e rispetto all'asse sono collegate ai capi della bobina. Nell'istante in cui la bobina è ortogonale alle linee di forza, il movimento dei due lati estremi è per un momento parallelo alle linee di forza, perciò nessuna di esse vien tagliata e la f.e.m. è nulla. Quando la bobina continua la rotazione, si genera una f.e.m. in una certa direzione che cresce fino a quando la bobina si dispone parallelamente alla linee di forza, perchè allora i suoi lati tagliano il massimo numero di linee di forza. Poi il numero di linee di forza tagliate diminuisce e si annulla, assieme alla f.e.m., quando la bobina si trova ancora disposta ortogonalmente rispetto alle linee di forza nell'istante successivo la f.e.m. avrebbe una direzione opposta. La posizione delle lamelle del collettore deve perciò essere tale che la commutazione dei capi della bobina abbia luogo esattamente nello stesso istante in cui avviene l'inversione della f.e.m., in modo che la corrente nel circuito esterno cresca e diminuisce ma conservi sempre la stessa direzione. Con il sistema della fig. 9 si otterrebbe una *cor-*

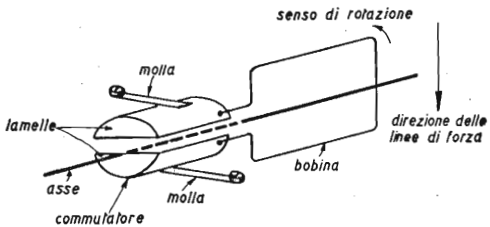


Fig. 9

rente continua pulsante (o una f.e.m.) come quella della fig. 10, che si può pensare composta da una corrente continua pura alla quale sia sovrapposta una corrente alternata.

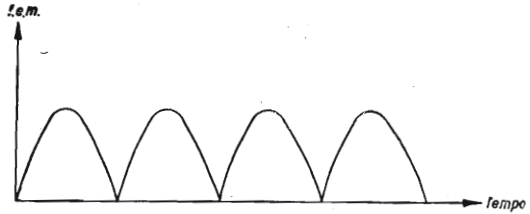


Fig. 10

Ritorniamo ancora al generatore di corrente alternata della fig. 8. Seguiamo le successive posizioni angolari della bobina rispetto alle linee di forza magnetiche (fig. 11). Si

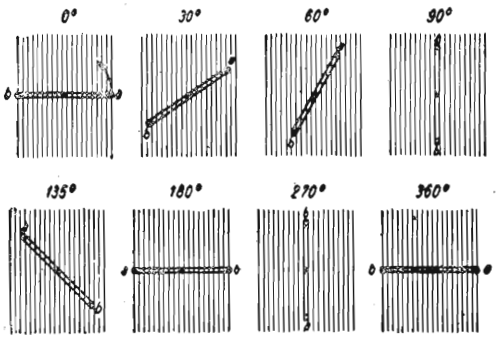


Fig. 11

riconosce che a 0° non viene tagliata alcuna linea dai lati *a* e *b* della bobina, a 90° il numero delle linee tagliate è massimo, a 180° è nullo, poi cresce ancora e dopo un giro completo (360°) è nuovamente nullo. Poichè i due lati *a* e *b* si invertono passando da 90° a 270°, sarà invertito anche il senso della f.e.m.

Poichè il moto del punto A che rappresenta un lato della spira (fig. 12) si muove su un cerchio di raggio 1 e poichè la

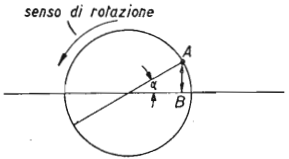


Fig. 12

circonferenza del cerchio vale $2 \times$ raggio $\times \pi$ ($\pi = 3{,}14$), la circonferenza in questo caso vale 2π. Per un determinato numero di cicli al secondo (frequenza), essa viene percorsa tante volte al secondo quante sono le oscillazioni (rotazioni) complete. Se si indica con f il numero dei periodi, la velocità del punto sulla circonferenza vale $2\pi f$. Qui si usa anche la lettera greca ω (omega) e si indica con $\omega = 2\pi f$ la « *velocità angolare* ».

Ora non è più difficile rispondere alla domanda su come si può produrre una f.e.m. alternata ad alta frequenza e come si può alimentare un circuito con corrente alternata ad alta frequenza. Basta solo ruotare abbastanza velocemente una bobina in un campo magnetico per avere il numero d'inversioni necessario.

Se si aumenta il numero dei poli e il numero delle bobine non occorre più una velocità così elevata per avere una certa frequenza. Nella pratica si sono infatti costruite delle macchine che danno direttamente la corrente alternata ad alta frequenza, per esempio i grandi trasmettitori ad onde lunghe di tutto il mondo sono alimentati da *generatori ad alta frequenza*, in essi però le bobine sono fisse ed all'interno gira una ruota con un grande numero di poli. In qualche

caso la frequenza viene anche raddoppiata o triplicata per avere disponibili alte frequenze di trasmissione per scopi speciali.

Nella fig. 12 la distanza del punto A dal diametro orizzontale dipende dall'angolo α, ad ogni valore dell'angolo di rotazione corrisponde una determinata distanza AB.

Nella matematica questa distanza, misurata nel cerchio di raggio 1, si chiama il « *seno* » dell'angolo, perciò anche la curva della fig. 13 che dà le distanze in funzione dell'angolo

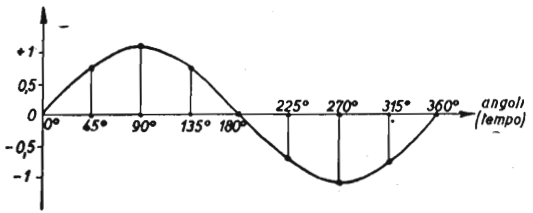


Fig. 13

si chiama « *sinusoide* » e si parla poi di corrente sinusoidale. Una curva di corrente come quella della fig. 46 della I parte non è sinusoidale o — se si considera la forma sinusoidale come caso normale — è deformata rispetto ad essa.

Trasformatori

In un sistema come quello della fig. 14*a*, in cui una bobina è infilata all'interno di un'altra ed è isolata rispetto ad essa, quando si manda corrente nella bobina I, si crea un campo magnetico. Questo campo non si forma istantaneamente all'atto dell'inserzione, ma le linee di forza escono

dalle spire verso tutte le direzioni ed il campo magnetico ha bisogno di un certo tempe per espandersi. Poi esso rimane costante e sparisce solo quando si interrompe la corrente, le linee di forza ritornano, in un certo senso, nelle spire della

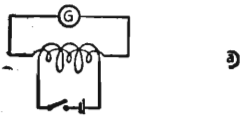


Fig. 14 a)

bobina. Il numero delle linee di forza create dalla bobina dipende dall'intensità della corrente. Tutte le linee di forza prese assieme si chiamano « flusso magnetico » ed esso si misura in « Maxwell » (1 Maxwell = 1 linea di forza).

Se si muove una bobina di fronte a delle linee di forza, e precisamente in senso trasversale rispetto alla direzione della linee, oppure se si muove il campo magnetico rispetto alla bobina si induce in questa una f.e.m. La bobina II viene incontrata dalle linee di forza in movimento per tutto il tempo impiegato dal flusso della bobina I per formarsi, perciò si induce in essa una f.e.m. e questa provoca un impulso di corrente indicato dal galvanometro *G*. All'atto dell'interruzione della corrente le linee di forza della bobina I rifanno il loro cammino attraverso le spire della bobina II ma in direzione opposta, perciò si induce in essa una f.e.m. di direzione opposta alla precedente e il galvanometro si sposta dall'altra parte. Se si manda nella I bobina (« *primario* ») una corrente alternata si ripete con continuità il gioco della espansione e del ritorno delle linee di forza, e nella II bobina (« *secondario* ») si induce una f.e.m. alternata. Questo dispositivo si chiama « *trasformatore* ». La tensione alternata indotta nella II bobina è tanto più grande quanto più è grande la corrente nel primario I, cioé il flusso magnetico, e quanto è più grande la velocità di variazione.

Se le due bobine hanno lo stesso numero di spire, la tensione indotta nella bobina seeondaria è uguale alla tensione che è applicata ai morsetti del primario, ammesso che tutte le linee di forza del primario incontrino le spire del secondario. Se il secondario ha meno spire, la sua tensione è minore, di quella del primario, se ne ha di più la sua tensione è maggiore. Questa coppia di bobine può quindi essere utilizzata per la trasformazione di tensioni e da quì deriva il nome di trasformatore. Nella radiotecnica si impiegano dei trasformatori con un nucleo di ferro, che aumenta l'induzione, facilitando il passaggio delle linee di forza, specialmente nei « *trasformatori di alimentazione* » collegati alla rete a corrente alternata e nei « *trasformatori per bassa frequenza o frequenza fonica* ». I « *trasformatori in aria* » senza nucleo magnetico si impiegano invece per la trasformazione di tensioni ad alta frequenza « *trasformatori ad alta frequenza* ». Negli ultimi anni si è però trovato un ferro adatto anche per le alte frequenze ed ora si usano sempre più anche in questo campo dei nuclei magnetici. Nella tecnica si usano anche altri tipi di trasformatori: i cosidetti « *trasformatori di misura* ».

Nella fig. 14*b* si è considerato il caso in cui praticamente

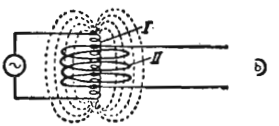


Fig. 14 b

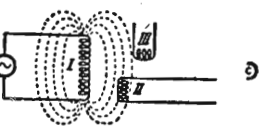


Fig. 14 c

tutte le linee di forza create dalla bobina I attraversano anche le spire della bobina II.

Nella fig. 14*c* la bobina II viene attraversata da un numero relativamente piccolo di linee di forza, la induzione è quindi molto più piccola di quella dell'esempio precedente,

in questo caso si parla di « *accoppiamento lasco* » (nel caso precedente di « *accoppiamento stretto* »).

La bobina III della fig. 14*c* ha le proprie spire parallele alle linee di forza, non è da loro tagliata, perciò non si genera in essa alcuna f.e.m. In questo caso si dice che la bobina I e III non sono accoppiate. Se si immerge solo una parte (II) di una bobina nel campo magnetico della bobina primaria (I) e si tiene l'altra parte (III) al di fuori del campo magnetico (fig. 14*d*) si potrebbe pensare la bobina secondaria come composta di due bobine, una delle quali si trova immersa nel campo magnetico e l'altra si trova fuori.

Se non tutte le linee di forza della bobina primaria incontrano la secondaria si dice che una parte di loro viene per così dire « dispersa » (*dispersione*), e la bobina III, che a causa della dispersione non viene attraversata da linee di forza, si chiama « *induttanza dispersa* ».

Il concetto di induttanza verrà chiarito più avanti. L'accoppiamento fra due bobine (*fattore di accoppiamento*) dice quante linee di forza di una bobina incontrano l'altra ed esso è dato spesso in per cento. Un fattore di accoppiamento del 100% significa perciò che tutte le linee di forza di una bobina attraversano anche l'altra e che la dispersione è nulla. Occorre però fare attenzione all'esistenza di due diversi fattori di accoppiamento, come si può vedere osservando la fig. 14*c*. Se I è la bobina primaria e II la secondaria si ha che il campo di I è grande, molte linee di forza incontrano la bobina II e il fattore di accoppiamento sarà maggiore

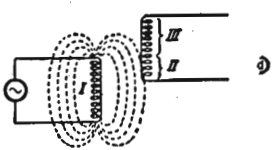


fig. 14 d)

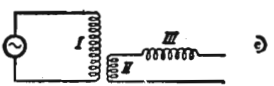


fig. 14 e)

del caso inverso in cui si considera come primario (collegata alla sorgente di tensione) la bobina II, perchè le linee di forza che attraverseranno I saranno poche (per I si ha un caso analogo a quello della fig. 14*d*) e il fattore di accoppiamento sarà minore.

Per ottenere un alto fattore di accoppiamento basta avvolgere le due bobine attorno allo stesso nucleo magnetico.

La trasformazione della resistenza

Nella radiotecnica capita spesso di avere una resistenza che non si adatta come valore al circuito che si vorrebbe costruire e si desidererebbe poter variare il suo valore. Se si tratta di circuiti in corrente alternata ciò è senz'altro possibile con l'impiego di un trasformatore.

Per spiegare ciò supponiamo ancora che tutte le linee del primario attraversino il secondario, cioè che nessuna linea di forza venga dispersa, e che le resistenze degli avvolgimenti siano così piccole da poter essere trascurate.

Noi abbiamo già ricordato che nella natura l'energia non va mai persa. Perciò l'energia assorbita dal primario del trasformatore deve essere ceduta dal secondario. Nella fig. 15 si suppone che il primario I che ha un numero di spire n_1 sia alimentato con una tensione di 100 V. Il secondario abbia un numero di spire n_2 5 volte superiore, cioè $n_2/n_1 =$ *rapporto di trasformazione* sia uguale a 5. Supponiamo infine di collegare al secondario una resistenza di 1000 Ω; attraverso essa i 500 V del secondario faranno passare una corrente di 0,5 A (poichè la resistenza dell'avvolgimento — resistenza interna — è piccola, la f.e.m. è uguale alla tensione ai morsetti). La potenza è uguale a $500 \times 0{,}5 = 250$ W. Questa potenza deve essere assorbita anche dal primario e poichè la sua tensione è di 100 V, la corrente deve essere 2,5 A (fig. 15*a*).

Se si invertono le condizioni della prova, cioè se si applicano 500 V e 0,5 A al secondario (fig. 15*b*), si devono avere

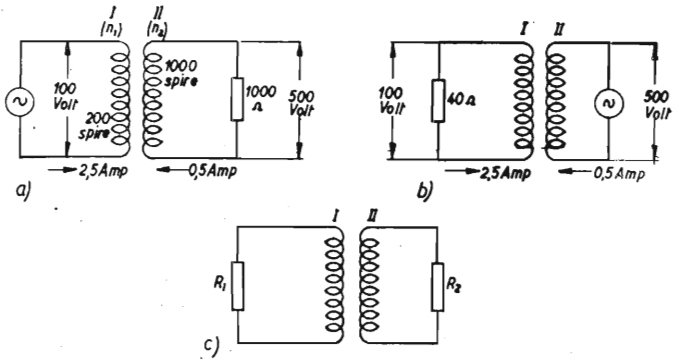


Fig. 15 a-c)

al primario 100 V e 2,5 A, ciò significa che ai suoi morsetti deve essere collegata una resistenza di 40 Ω. Riassumendo: la tensione primaria appare al secondario moltiplicata per 5 e la corrente diventa invece 1/5, la resistenza collegata al secondario si comporta come una resistenza 25 volte più

piccola $\left(25 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\right)$ collegata direttamente al primario

e viceversa una resistenza collegata al primario appare 25 volte maggiore dalla parte del secondario.

In generale si può dire che se si ha una resistenza R_2 e si vuole portare il suo valore a R_1 il rapporto di trasforma-

zione del trasformatore da impiegare si determina con la relazione:

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = \frac{R_2}{R_1} \qquad \text{oppure} \qquad \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$$

Ricordiamo ancora una volta che i trasformatori si possono usare solo per la corrente alternata. Inoltre si deve pensare che il trasformatore ideale, in cui la potenza assorbita dal primario viene tutta ceduta dal secondario, è praticamente irrealizzabile, perchè ci sono sempre delle perdite di potenza. Queste perdite sono composte dalle perdite nella resistenza ohmica degli avvolgimenti e dalla perdite per correnti parassite nel ferro. Per avere un'idea di queste perdite chiamiamo rendimento di un trasformatore il rapporto fra la potenza ceduta e quella assorbita e diciamo che i trasformatori normali hanno un rendimento del 95 - 98%.

I vibratori

Una corrente che abbia l'andamento della fig. 46 della parte I è sempre una corrente alternata, essa può perciò essere trasformata con un trasformatore. Per trasformare una corrente continua normale in una corrente ad impulsi è necessario avere un meccanismo che inverta il senso della corrente ad intervalli di tempo regolari. Con un commutatore a mano è impossibile seguire un ritmo così veloce e così preciso, perciò si usa di solito o un commutatore azionato da un motore o un sistema simile a quello del campanello elettrico (che si chiama vibratore o autointerruttore).

Per gli apparecchi radioriceventi il vibratore viene impiegato sopratutto quando si ha a disposizione solo della corrente continua e si devono alimentare degli apparecchi costruiti per essere collegati alla rete a corrente alternata.

Il sistema completo si chiama « *survoltore* » ed è costituito dal commutatore vibrante e dal trasformatore. Anche negli apparecchi per auto nei quali è disponibile solo un accumulatore da 6 o da 12 V si impiegano sempre questi survoltori, con essi è possibile ottenere le elevate tensioni necessarie.

L'autoinduzione

Pensiamo di avere una bobina formata da due strati avvolti uno sopra l'altro (fig. 16), si può senz'altro dire che,

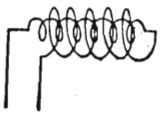


Fig. 16

quando si invia una corrente nella bobina, le linee di forza create dalle spire interne inducono una f.e.m. nelle spire esterne e che le linee di forza delle spire esterne ne inducono una in quelle interne. Si deve quindi concludere che in generale una corrente inviata in una bobina induce una f.e.m. sulle proprie spire. L'induzione si riflette sulla bobina stessa e perciò si parla di « *autoinduzione* ». E' possibile misurare anche queste grandezze e fissare per esse una unità di misura. Poichè una f.e.m. può essere generata solo da una variazione del campo magnetico e perciò anche da una variazione della corrente e poichè da una variazione veloce si ha una f.e.m. elevata e da una variazione lenta una f.e.m. bassa si capisce come la f.e.m.di autoinduzione dipenderà dal tempo e dalla corrente. Dunque se in una bobina si induce una ten-

sione di 1 V, quando la corrente che la percorre varia di 1 A in un secondo, si dice che quella bobina ha un'autoinduzione (o un *coefficiente di autoinduzione*) di 1 Henry (H). anche in questo caso si usano i sottomultipli: 1 millihenry

$\left(\text{mH} = \frac{1}{1000}\ \text{H}\right)$ e 1 microhenry $\left(\mu\text{H} = \frac{1}{1000}\ \text{mH} = \right.$

$\left. = \frac{1}{1000000}\ \text{H}\right)$ e qualche volta si usa un'unità più piccola

ancora 1 cm $= \frac{1}{1000}\ \mu\text{H}$.

Bobine di autoinduzione e trasformatori della radiotecnica

Nella radiotecnica si incontrano le forme più svariate di bobine di autoinduzione. Per la sintonizzazione nel campo delle onde corte si impiegano dei valori da 1 a 100 μH, per le onde medie si adottano di solito 200 μH (0,2 mH) e per le onde lunghe il valore di 2 mH. Le bobine per l'allungamento delle antenne hanno dei valori da 0,5 a 20 mH. Le bobine di blocco per le onde corte sono di 0,5 mH e per le onde medie e lunghe di 35 e 120 mH. Per il circuito anodico di valvole con griglia schermo o di pentodi si arriva fino a

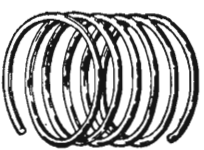


Fig. 16 a)

Fig. 16 b)

1000 H. Le bobine di filtro degli alimentatori hanno un'induttanza di 5 - 30 H. Le fig. 16*a-f* mostrano tutta una serie di bobine e di trasformatori tipici. La bobina della fig. 16*a* è formata da un tubo di rame autoportante impiegato spesso nei trasmettitori, *b*) è una bobina per ricevitori ed è avvolta su un corpo di ceramica, *c*) è una bobina con avvolgimento

Fig. 16 c)

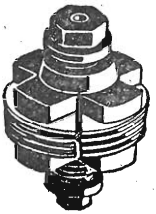


Fig. 16 d)

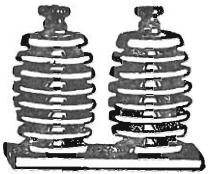


Fig. 16 e)

a nido d'ape con delle spine di inserzione per facilitare la sostituzione, in essa le spire sono incrociate in modo da avere una distanza relativamente elevata fra spire successive, *d*) è una bobina con nucleo per alta frequenza ed *e*) è una bo-

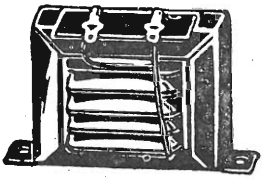


Fig. 16 f)

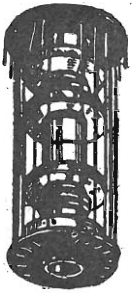


Fig. 16g)

bina di blocco per alta frequenza formata da due metà uguali. La bobina della fig. 16*f* è una bobina per bassa frequenza con nucleo in ferro. Più bobine, con o senza nucleo ad alta frequenza, possono essere montate in singoli complessi e funzionare in parte secondo il principio del trasformatore (fig. 16*g*) oppure essere collegate in modi diversi con un commutatore (fig. 16*h*).

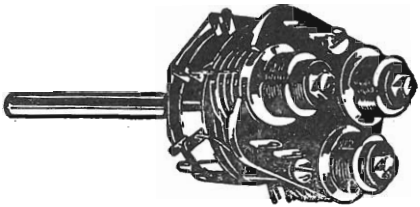


Fig. 16 h)

Per la trasformazione delle tensioni a frequenza fonica negli amplificatori a bassa frequenza ecc, le bobine vengono avvolte su nuclei di ferro ed uno schermo metallico avvolge più volte tutto il trasformatore (fig. 16*i*). I trasformatori di

Fig. 16 i)

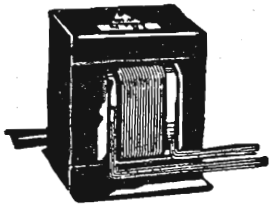


Fig. 16 k)

alimentazione vengono costruiti anche senza schermo e i terminali possono essere liberi o collegati a morsetti o a pagliette di saldatura.

L'induttanza o autoinduzione di una bobina dipende soprattutto dal numero di spire. Poichè ciascuna spira induce una f.e.m. in tutte le altre, è chiaro che è determinante il quadrato del numero di spire ($n^2 = n \times n$). Altri fattori che influenzano l'induzione sono la lunghezza, il diametro e la forma e le caratteristiche dell'eventuale nucleo magnetico. Per le attuali bobine di induzione con nucleo magnetico per alta frequenza, poichè la loro induttanza è maggiore a causa della presenza del nucleo magnetico, e perchè del resto le dimensioni esterne sono fisse, l'autoinduzione di una bobina si può calcolare servendosi di un fattore caratteristico del nucleo K e del numero di spire n con la formula:

$$L = Kn^2 \quad \text{oppure} \quad n^2 = \frac{L}{K} \quad \text{oppure} \quad n = \sqrt{\frac{L}{K}}$$

L'induttanza è molto simile all'inerzia

Se si allargano le prime tre dita della mano destra in modo da formare tre angoli retti e se si dirige l'indice secondo le linee di forza di un campo magnetico (dal Nord al Sud) e il pollice nella direzione in cui si muove un conduttore immerso nel campo magnetico, il dito medio indicherà il senso della corrente indotta (dal + al —). Facciamo lo stesso con la mano sinistra e poniamo ancora il medio nella direzione della corrente e l'indice nella direzione delle linee di forza, il pollice indicherà allora la direzione del moto di un conduttore immerso nel campo magnetico, libero di muoversi e percorso da corrente. Il moto delle linee di forza

rispetto alla bobina è relativo; la bobina può anche essere ferma, essa viene tagliata dalle linee di forza che si liberano da essa stessa. Come si può facilmente dedurre osservando la fig. 17*a* e *b* la *tensione di autoinduzione* che si genera allo

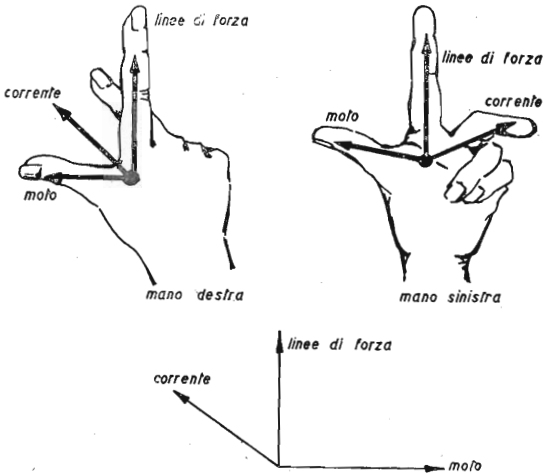


Fig. 17

atto dell'inserzione è di direzione opposta alla tensione che vuole fare passare la corrente nella bobina.

Solo quando tutte le linee di forza sono uscite dalla bobina, si stabilisce una condizione di riposo e la tensione di autoinduzione si annulla. La corrente per creare il campo magnetico deve spendere un certo lavoro, l'energia corrispondente viene immagazzinata dalla bobina ed essa si libera nuovamente quando si interrompe bruscamente il circuito e le linee di forza rientrano nella bobina. Poichè esse ripercorrono a ritroso il cammino precedente la f.e.m. di auto-

induzione ha un senso opposto a quello di prima ed ha la stessa direzione di quello della sorgente di corrente.

Nel circuito della fig. 18 costituito dalla batteria, dallo amperometro e da due resistenze: R_1 piccola e R_2 di valore

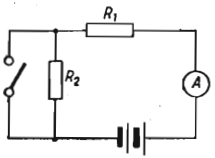


Fig. 18

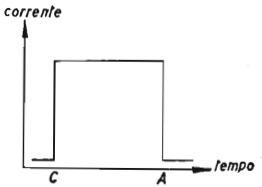


Fig. 19

elevato, passa una piccola corrente, determinata dalla somma delle resistenze e dalla tensione ai morsetti della batteria. Appena si chiude l'interruttore (C) la corrente aumenta istantaneamente al valore fissato da R_1 e dalla tensione della batteria (fig. 19). All'apertura dell'interruttore (A) si ritorna immediatamente al valore piccolo della corrente. Il circuito si compórta in modo diverso se oltre alle due resistenze si inserisce anche una bobina di induzione L di resistenza ohmica trascurabile (fig. 20). Alla chiusura dell'interruttore tutta la tensione della batteria viene a trovarsi applicata ai capi di R_1 ed L in serie, però all'inizio dell'aumento della

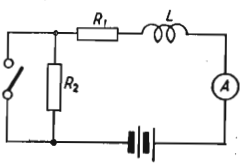


Fig. 20

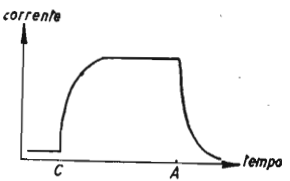


Fig. 21

corrente a causa delle linee di forza che si liberano dalla bobine nasce una forza controelettromotrice che frena l'aumento della corrente, in modo che il suo andamento è quello indicato dalla fig. 21. All'atto dell'apertura (A) si annulla quasi completamente la tensione ai capi della bobina, però è ancora presente tutta l'energia in essa immagazzinata e la corrente può raggiungere il valore finale solo gradualmente. La corrente segue la tensione « zoppicando ». L'effetto ritardante della bobina è tanto più forte quanto più è alta la sua induttanza.

E' importante sottolineare il fatto che una bobina si oppone a qualsiasi variazione della corrente. E' indifferente che si tratti di una corrente continua che all'atto dell'inserzione genera una forza controelettromotrice (f.c.e.m.) o che si tratti di una corrente alternata. La differenza consiste solo nel fatto che con la corrente alternata il fenomeno dell'inserzione si ripete ad ogni inversione della direzione. Cioè ogni volta che la corrente alternata inverte la propria direzione la bobina si oppone, ossia essa rappresenta una nuova resistenza per la corrente alternata.

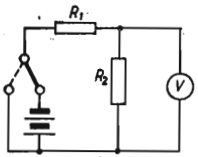
E' facile trovare un'analogia meccanica dell'effetto ritardante di L. Supponiamo di avere un veicolo su una strada. Se si tenta di spingerlo in avanti si nota che si deve applicare la forza per un certo tempo prima di poterlo mettere in movimento (vincere la sua « *inerzia* »), e poi la stessa forza basta per mantenerlo in moto. Se lo si abbandona improvvisamente esso non si ferma subito ma continua ad avanzare per un altro po' (a causa della propria « *forza d'inerzia* »). La induttanza si comporta quindi come una massa d'inerzia.

In modo analogo si comporta anche un condensatore che sia collegato ad una batteria attraverso una resistenza.

Se nel circuito della fig. 22 si sposta il commutatore verso destra si può con il voltometro V misurare subito ai capi di R_2 una tensione che corrisponde alla divisione di tensione data da R_1 e R_2 (fig. 23). Commutando l'interruttore a sinistra

la tensione si annulla immediatamente. Le cose sono diverse se si inserisce nel circuito un condensatore (fig. 24) al quale viene applicata la tensione attraverso la resistenza R_1. Dalla batteria esce una corrente che va ad aumentare la tensione del condensatore.

Fig. 22



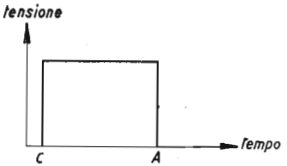


Fig. 23

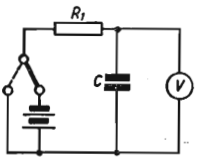


Fig. 24

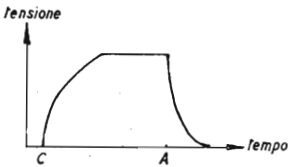


Fig. 25

Quanto più questa è elevata, tanto minore sarà l'effetto della tensione della batteria ad essa opposta e tanto minore sarà l'aumento progressivo di tensione osservato in V (fig. 25), fino a quando il condensatore è completamente caricato. Se si gira a sinistra il commutatore sparisce istantaneamente la tensione della batteria, ma non quella del condensatore. Esso si scarica in un certo tempo attraverso la resistenza R_1: la corrente precede in un certo senso la tensione.

Resistenze, condensatori e induttanza nei circuiti in corrente alternata

Una resistenza ohmica, percorsa da una corrente continua, consuma una certa potenza: RI^2 che si trasforma in calore (vedi pag. 36 della parte I). E' logico pensare che la resistenza si comporti allo stesso modo anche in un circuito a corrente alternata e che la potenza consumata venga ancora trasformata in calore.

Nella fig. 26*a* sono rappresentate le condizioni che si presentano quando viene applicata ad una resistenza una

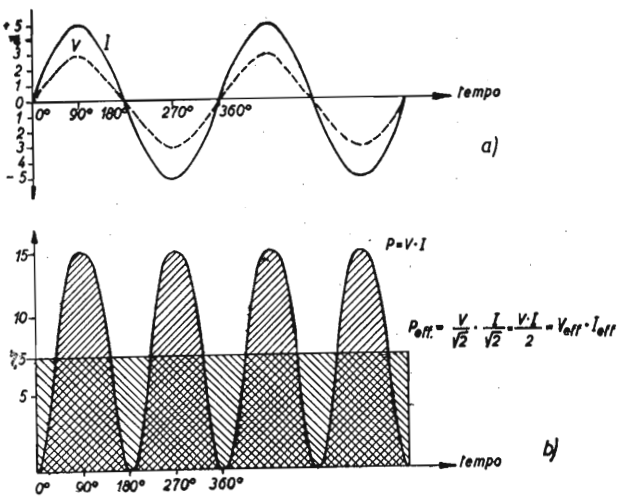


Fig. 26

tensione alternata di 3 V e attraverso la quale passa una corrente alternata di 5 A; la resistenza deve allora avere un valore uguale a 3/5 cioè a 0,6 Ω. Quando la tensione cresce, cresce anche la corrente, e quando diminuisce, anche questa ultima deve diminuire. La potenza trasformata in ogni istante in calore si può determinare moltiplicando istante per istante il valore della corrente per il valore della tensione. Si ottiene così la curva della fig. 26*b* che è sempre positiva perchè + × + è uguale a + e — × — è uguale ancora a +.

E' facile convincersi che la potenza trasformata in calore, la potenza reale (« *attiva* ») P_{eff} si può rappresentare anche con una linea retta distante + 7,5 dall'asse delle ascisse. Per convincersi di ciò basta solo pensare di ritagliare i picchi sporgenti al di sopra di questa retta e riempire con essi i buchi che si trovano al di sotto.

Una potenza rappresentata da una linea retta è una potenza data da una corrente continua. Il valore massimo della curva di potenza è dato dal prodotto dell'ampiezza della tensione per l'ampiezza della corrente, il valore medio è evidentemente uguale alla metà del valore massimo, in altre parole la potenza media trasforma in calore in una resistenza percorsa da corrente alternata si può ottenere, moltiplicando l'ampiezza della corrente per l'ampiezza della tensione e di dividendo il prodotto per 2, oppure moltiplicando il *valore efficace* della tensione ($\frac{1}{\sqrt{2}}$ dell'ampiezza) per il *valore efficace* della corrente ($\frac{1}{\sqrt{2}}$ dell'ampiezza) (infatti:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2}).$$

Che cosa succede invece nel caso di un condensatore? Consideriamo il caso in cui la sorgente fornisca ad esso la corrente massima (ampiezza) cioè che esso sia in carica. In questo istante la tensione ai capi del condensatore deve essere ancora nulla, perchè la corrente diminuisce quando esso inizia a caricarsi. La tensione cresce, il condensatore, si carica, la corrente diminuisce e diventa nulla quando il condensatore è carico cioè quando la tensione è massima. Poi la corrente inverte la sua direzione, ritorna alla sorgente, il condensatore si scarica e quando la corrente ha raggiunto

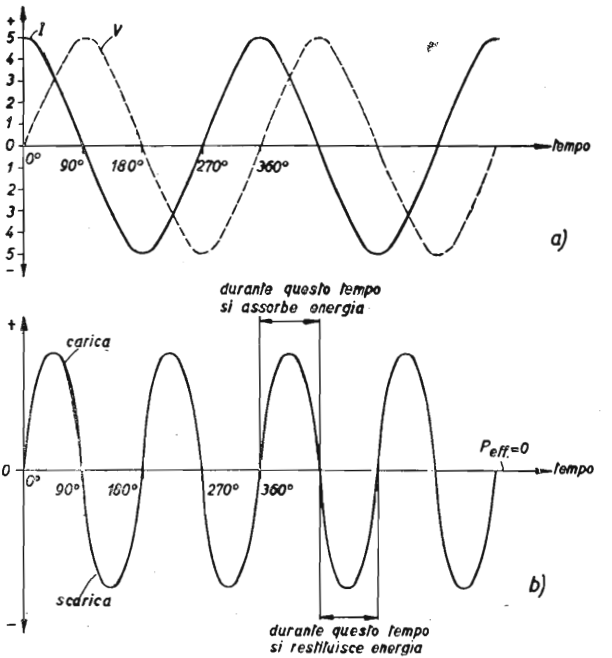


Fig. 27

il valore massimo nella direzione opposta la tensione è nuovamente nulla. Poi il condensatore comincia a caricarsi dalla parte opposta e così via (fig. 27*a*). In questo caso è la tensione che segue « zoppicando » la corrente, la corrente precede la tensione (anticipa rispetto ad essa) di un angolo (vedi fig. 13) di 90°. Si dice anche che le fasi della corrente e della tensione sono spostate di 90°.

Durante la carica il condensatore immagazzina dell'energia che cede quando si scarica. Se non ci fosse in gioco alcuna resistenza ohmica, cioè se il condensatore avesse un isolamento idealmente perfetto esso cederebbe sempre la stessa energia che ha assorbito e niente andrebbe perso. Se si disegna la curva della potenza moltiplicando punto per punto i valori della tensione e della corrente, tenendo presente che $+ \times + = +$, $- \times - = +$ e che $+ \times - = -$, si ottiene la curva della fig. 27*b* e si capisce l'esattezza della conclusione precedente. La potenza oscilla attorno all'asse delle ascisse, diventa positiva e negativa e la potenza media effettivamente utilizzata è nulla. In questo caso in cui la corrente e la tensione sono sfasate di 90° si parla di « *potenza reattiva* » ed il condensatore si chiama resistenza apparente o meglio « *reattanza capacitiva* ».

In realtà attraverso il condensatore non passa mai corrente, poichè però il condensatore può venire caricato e scaricato, in un circuito contenente un condensatore può stabilirsi una corrente alternata.

Se la corrente alternata ha una frequenza elevata arriva al condensatore in un determinato tempo una quantità di elettricitá superiore al caso di una variazione più lenta. Però la quantità di elettricità al secondo è la corrente ed essa si misura in ampere, quindi l'intensità della corrente dipende dalla frequenza e precisamente l'intensità di corrente che passa in un certo condensatore sottoposto ad una tensione di frequenza determinata si raddoppia quando si raddoppia la frequenza o la velocità angolare ($\omega = 2\pi f$). Inoltre a fre-

quenza e tensione costante la corrente si può raddoppiare anche raddoppiando la capacità del condensatore, perchè per caricare un condensatore di capacità maggiore occorre una quantità di elettricità e quindi una corrente maggiore. Perciò la corrente I che si ha con una tensione alternata V vale:

$$I = V \cdot \omega \cdot C$$

E poichè nella legge di Ohm $I = \frac{V}{R}$, dove R è la resistenza, si può indicare con $X_c = \frac{1}{\omega C}$ la « *reattanza in corrente alternata* » del condensatore.

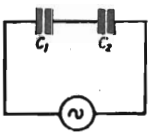


Fig. 28

Anche i condensatori, come le resistenze, si possono collegare sia in serie che in parallelo. Se si collegano due resistenze in serie i loro valori si sommano.

Se si collegano in serie due condensatori C_1 e C_2 e si alimentano con una sorgente di corrente alternata (fig. 28) le loro reattanze si sommano e si ha:

$$X = X_1 + X_2 \qquad \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}$$

Dove C è un condensatore che si comporta come i due condensatori C_1 e C_2 in serie. Il suo valore si può calcolare eliminando ω dalla seconda formula:

$$C = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

Cioè il condensatore *equivalente* a due condensatori in serie si calcola in modo analogo alla resistenza equivalente a due resistenze in parallelo.

Se si hanno invece due condensatori in parallelo la reattanza risultante si calcola in modo analogo a quello della resistenze ohmiche $\frac{1}{X} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2}$ cioè:

$\omega C = \omega C_1 + \omega C_2 = \omega (C_1 + C_2)$, ossia la capacità equivalente a due condensatori in parallelo $C = C_1 + C_2$ si ottiene con una formula simile a quella che dà la resistenza equivalente a due resistenze in serie. Ciò è chiaro anche perchè si può pensare che, invece di prendere le due coppie di armature e di collegare le armature corrispondenti, si potrebbero prendere già all'inizio due piastre con una superficie pari alle somme delle superfici.

In una bobina sottoposta ad una tensione alternata, all'aumento della tensione aumenterà anche la corrente, però poichè la f.e.m. di autoinduzione è opposta alla tensione applicata, l'aumento della corrente sarà ritardato. D'altra parte quando la tensione applicata diminuisce la bobina continuerà a fornire una « extracorrente » nella stessa direzione. L'intensità della corrente può aumentare tanto meno quanto è più rapida la variazione della tensione, cioè quanto è più alta la velocità angolare $\omega = 2\pi f$ e viceversa essa sarà tanto più alta quanto è più bassa ω. Inoltre all'aumentare dell'induttanza L cresce anche la forza con cui la bobina si oppone al flusso della corrente, perciò cresce la sua resistenza alla corrente alternata: la sua reattanza. Le bobine che servono a tenere bassa una corrente alternata si dicono « *bobine di blocco* ». Se, a parità di tensione e di induttanza, si raddoppia la frequenza, l'intensità di corrente diventa la metà, come sarebbe successo se a parità di frequenza e di

tensione si fosse raddoppiata l'induttanza. La formula che vale in questo caso è allora $I = V/\omega L$ e la *reattanza induttiva* della bobina vale: $X_r = \omega L$.

Consideriamo un circuito in cui sia inserita solo un'induttanza che non presenti alcuna resistenza ohmica; la tensione V applicata farà passare una certa corrente nella

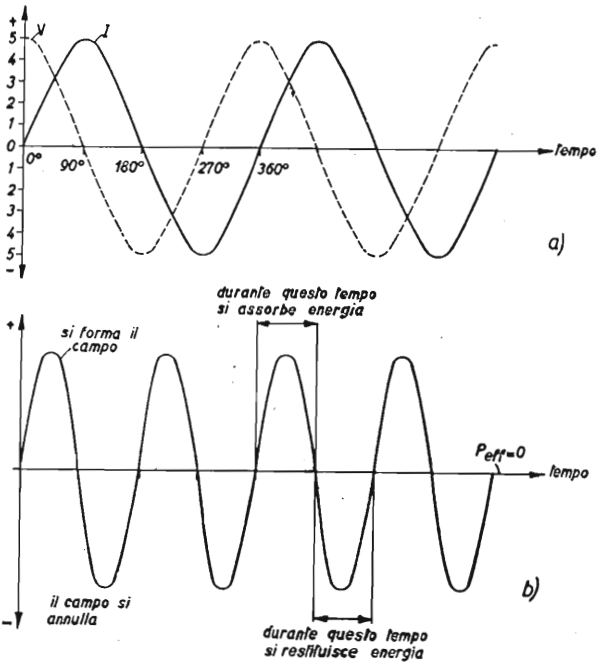


Fig. 28

bobina. Quando la tensione è massima la corrente è ancora nulla. Quando essa comincia a crescere si genera una f.c.e.m.

(f.e.m. di autoinduzione) nella bobina, la tensione comincia a diminuire ed intanto si va formando il campo magnetico della bobina. Alla fine la corrente raggiunge un massimo quando la tensione si annulla. Allora comincia a dissolversi il campo magnetico, la tensione cresce nel senso opposto e così via (fig. 28*a*). In questo caso la tensione precede la corrente, la corrente viene dopo la tensione ed il suo ritardo è esattamente di 90°. Durante il periodo di tempo in cui si forma il campo magnetico della bobina viene assorbita dall'energia, però la stessa energia (poichè mancano delle resistenze ohmiche) viene restituita tutta, quando il campo magnetico si annulla e le linee di forza spariscono.

Se una sorgente di tensione alternata alimenta un condensatore o una induttanza si dice che ad essa è applicato un *carico apparente* capacitivo o induttivo. Invece una resistenza ohmica è un *carico reale* e la potenza da essa consumata si chiama *potenza attiva*.

Il calcolo vettoriale dei circuiti in corrente alternata - Circuiti oscillanti e loro caratteristiche

Noi abbiamo visto più indietro che la corrente e la tensione nelle bobine e nei condensatori (induttanza e capacità) sono spostate di fase. Osservando la fig. 11, si potrebbe immaginare che la corrente e la tensione siano prodotte da due bobine separate e ruotate di 90° una rispetto all'altra, in modo che, quando una taglia il massimo numero di linee di forza l'altra non ne taglia nessuna e viceversa.

Se si disegna sulla carta questa considerazione si ottiene la fig. 29. Nella fig. 29*a* sono rappresentate le condizioni che si presentano per il caso di una resistenza ohmica inserita in un circuito a corrente alternata (confronta fig. 26). In

questo caso non c'è alcun spostamento di fase, perciò anche le due bobine sono sovrapposte e non sono spostate una rispetto all'altra. Le due freccie (vettori) per la tensione V e per la corrente I indicano la direzione della bobina e con

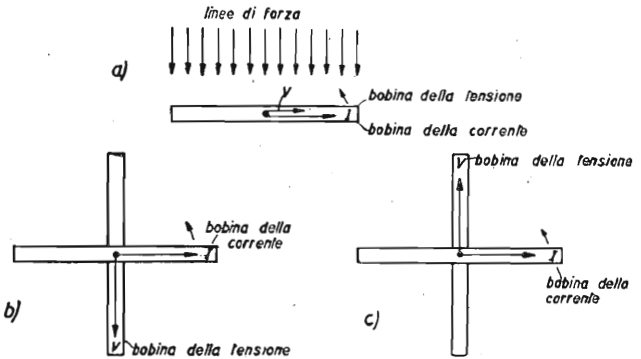


Fig. 29

la loro lunghezza possono rappresentare il valore numerico della grandezza a cui si riferiscono (ciò sarà utile più avanti). Per esempio se noi abbiamo una tensione di 3 V ed una corrente di 5 A possiamo fare le freccie (vettori) corrispondenti lunghe 3 o 5 (mm o cm), secondo lo spazio che abbiamo a disposizione sul foglio. Pero per ogni tipo di grandezza(corrente o tensione) bisogna mantenere nello stesso disegno sempre la stessa scala, perchè altrimenti sparirebbe l'utilità del diagramma che consiste appunto nella confrontabilità dei diversi valori.

Nella fig. 29*b* sono rappresentate due bobine disposte ortogonalmente (spostate di 90°) e due vettori che rappresentano con la loro direzione e la loro lunghezza la corrente e

la tensione del condensatore di fig. 27. Se le bobine vengono ruotate nel senso delle freccie si vede che la corrente precede di 90° la tensione.

Infine nel caso di una bobina (induttanza) si ha la fig. 29*c* in cui sono riportate le bobine ed i vettori corrispondenti alla fig. 21. Il fatto che nella fig. 29 la bobina della corrente abbia sempre la stessa posizione, cioè che il vettore della corrente sia sempre diretto verso sinistra non è strettamente necessario, infatti la coppia di vettori potrebbe essere ruotata in una posizione qualsiasi, quel che è veramente importante è la loro posizione reciproca. Però per gli scopi pratici è utile, come vedremo subito, che la corrente sia sempre disegnata in quella posizione. Ricordiamo ancora che per distinguere convenzionalmente due direzioni opposte si può assegnare il segno più (+) ai vettori diretti verso destra o verso l'alto ed il segno meno (—) ai vettori diretti verso sinistra o verso il basso.

Supponiamo ora di collegare in serie, in un circuito in corrente alternata, una induttanza L ed una capacità C con le reattanze $X_L = \omega L$ ed $X_C = \frac{1}{\omega C}$ (fig. 30). La corrente alternata I fornita dalla sorgente passa attraverso a tutte e due. Secondo la legge di Ohm, la tensione ai capi della bobina vale: $X_L = X_L \cdot I$ e quella ai capi del condensatore

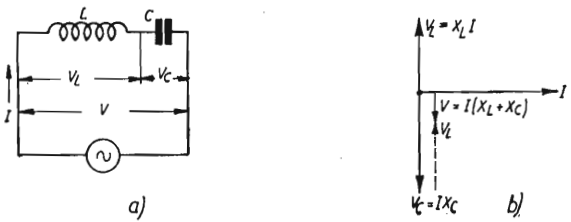


Fig. 30

$V_C = X_C \cdot I$. Confrontando la fig. 29 si vede che il vettore della tensione della bobina è diretto verso l'alto ($+ V_C$ oppure $+ \omega I L$) e che quello della tensione del condensatore è diretto verso il basso ($- V_C$ oppure $- \frac{I}{\omega C}$), mentre il vettore della corrente è diretto in tutte e due i casi verso destra ($+ I$). Supponiamo che la corrente I sia 9 A, essa sarà indicata da un vettore diretto verso destra e lungo 9 unità (per es. 9 cm). La tensione ai capi della bobina sia $V_L = 4\ V$, il vettore corrispondente sarà lungo 4 cm e sarà diretto verso l'alto (ad angolo retto — 90° — rispetto alla corrente I).

La tensione ai capi del condensatore sia 6 V; essa in questo caso sarà rappresentata da un vettore lungo 6 cm diretto verso il basso. Si ottiene allora un diagramma come quello della fig. 30*b*. Ora, per ottenere il valore totale della tensione V, basta solo partire dall'estremità di V_C e spostarsi verso l'alto per una lunghezza pari a quella di V_L, cioè basta sottrarre V_L a V_C ($-6 + 4 = -2$) e indicare con V il vettore lungo 2 cm e diretto verso il meno (—). Quindi con questo diagramma si può leggere subito il valore cercato senza bisogno di alcun calcolo. Non abbiamo disegnate le bobine per avere una maggiore chiarezza.

Dal disegno si può trarre un'altra importantissima conclusione: può infatti capitare che la reattanza del condensatore e della bobina siano uguali. Se nella fig. 30*b* fosse per esempio $V_L = 4$ $V_C = -4$ $(+ 4 + (-4) = 0)$ si avrebbe $V = 0$. Ciò significa che la sorgente è cortocircuitata e che attraverso la bobina ed il condensatore passa la corrente di cortocircuito.

La tensione totale V si può anche ottenere moltiplicando I per la somma delle reattanze capacitive e induttive:

$V = I\,(X_L + X_C)$ in cui $X_L = \omega L$ e $X_C = \frac{1}{\omega C}$. Però

nelle figg. 29*b* e *c* $V_C = I\,X_C$ e $X_L = I\,X_C$ sono diretti in senso opposto perciò a V_C si deve dare il segno negativo (—) e a V_L il positivo (+), quindi si deve scrivere:

$V = I\,(\omega L - \frac{1}{\omega\,C})$ e quando $\omega L = \frac{1}{\omega\,C}$, cioè quando le due reattanze sono uguali, l'espressione fra parentesi si annulla ed anche la tensione si annulla. Si vede che il disegno ha il vantaggio di portare direttamente alla conclusione senza bisogno di tanti ragionamenti e tanti calcoli.

Dal calcolo si può però trarre una utile conlusione: quando

$\omega L = \frac{1}{\omega\,C}$ si ha $\omega^2 = \frac{1}{L\,C}$ e $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ e poichè

$\omega = 2\pi f$ si ha $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Se si esprime C in farad e L in henry questa formula dà quindi la frequenza in hertz alla quale le reattanze di L e di C si uguagliano. Questa condizione si chiama di « *risonanza* » e si dice che il circuito è « sintonizzato » sulla frequenza f. Poichè la bobina ed il condensatore sono in serie si parla anche di « *risonanza serie* ».

I circuiti con « risonanza serie » si impiegano nella radiotecnica nei casi in cui si desidera cortocircuitare una sorgente di corrente alternata per una determinata frequenza. Per esempio uno di questi circuiti collegato fra l'antenna e la terra di un ricevitore può servire a cortocircuitare la frequenza del trasmettitore locale o a eliminare i disturbi che si possono avere a causa di un ritorno della media frequenza sull'antenna.

Nella fig. 31*a* sono disegnate le condizioni che si presentano quando una bobina ed un condensatore sono collegati in parallelo ad un generatore. In questo caso è applicata ai

due elementi la stessa tensione e sono diverse solo le correnti che li percorrono, quindi per avere una maggiore chiarezza è consigliabile indicare orizzontalmente e diretta verso destra la tensione V (fig. 31*b*). Allora (vedi fig. 29) il vettore per la

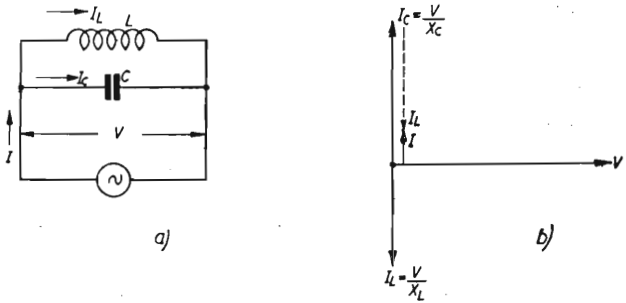


Fig. 31

corrente del condensatore I_C deve essere diretto verso l'alto e quello per la corrente della bobina I_L deve essere diretto verso il basso; si ottiene alla fine uno schema simile a quello della fig. 30*b*, si sono solo scambiate le correnti con le tensioni. Si può osservare che quando la corrente della bobina diventa uguale a quella del condensatore cioè quando le reattanze di C ed L diventano uguali ($\omega L = \frac{1}{\omega C}$), la corrente si annulla. Il circuito risonante formato da un condensatore in parallelo con una bobina blocca la corrente, ai suoi capi si trova la piena tensione a vuoto del generatore, perchè questo non è caricato. Quando $X_L = X_C$ cioè quando $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ si ha anche in questo caso una « *frequenza di*

risonanza » che si può calcolare con la formula vista prima. Questo nuovo tipo di risonanza si chiama « *risonanza parallela* » o « *antirisonanza* ».

I circuiti risonanti in parallelo vengono impiegati in tutti quei casi in cui si ha bisogno di mantenere possibilmente il valore della tensione a vuoto di una qualche sorgente, essi sono, i circuiti più impiegati nella parte ad alta frequenza dei ricevitori radio. L'effetto di blocco per la corrente di un tale circuito alla frequenza di risonanza lo rende utile per esempio per bloccare un trasmettitore disturbante e da ciò deriva la denominazione « *circuito di blocco* ».

In tutte le considerazioni precedenti si è supposto che non entri in gioco alcuna resistenza ohmica. Ciò non si può senz'altro ottenere nel caso della bobina, perchè anche il filo di rame più grosso ha sempre una — sia pur minima — resistenza ohmica. Lo stesso si ha con i terminali e le piastre di un condensatore: anche loro hanno una resistenza.

Si può immaginare in tutte e due i casi che in serie ad una bobina ideale (senza resistenza) e ad un condensatore ideale sia posta una resistenza ohmica corrispondente alle resistenze effettive della bobina e del condensatore. Nel caso della bobina e del condensatore ideali ed anche nel caso dei loro collegamenti in serie e in parallelo si aveva al di fuori del caso di risonanza solo un carico reattivo: capacitivo o induttivo; è chiaro invece che nel caso reale, per la presenza di una resistenza ohmica, si avrà anche una parte di carico attivo corrispondente che verrà trasformato in calore. Nel seguito spiegheremo come stanno le cose.

Consideriamo dapprima un circuito in cui si trovino in serie due resistenze ohmiche R_1 e R_2 (fig. 32*a*). Ai loro capi si hanno le tensioni $V_1 = R_1 I$ e $V_2 = R_2 I$, se il generatore, con la tensione V, fa passare attraverso le due resistenze una corrente I. In questo caso non si hanno spostamenti di fase, perciò i tre vettori V_1 V_2 e V si trovano diretti nello stesso

senso di I, precisamente verso destra, e la somma delle lunghezze di V_1 e V_2 deve evidentemente corrispondere a quella di V (fig. 32*b*).

Se si sostituisce una resistenza ohmica con un condensatore, cioè con una reattanza capacitiva $X_C = \frac{1}{\omega C}$ (figu-

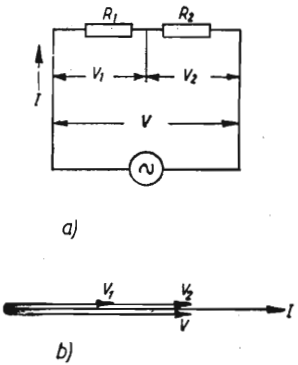


Fig. 32

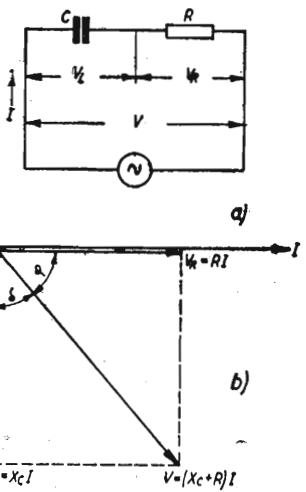


Fig. 33

ra 33) si avrà ai suoi capi una tensione $V_C = X_C I$ che sarà spostata di 90° rispetto a quella della resistenza R (V_R). Per avere la tensione totale occorre ora combinare assieme in qualche modo i due vettori V_R e V_C. Non è possibile sottrarli semplicemente, perchè ciò sarebbe esatto solo se le loro direzioni fossero opposte (angolo di 180°) e non si possono nemmeno sommare direttamente perchè non hanno la

stessa direzione (angolo di 0°). Ci si serve allora di un artificio. E' facile dimostrare che la tensione V totale ai capi del condensatore e della resistenza in serie è uguale alla diagonale del rettangolo in parte tratteggiato. Che ciò sia esatto si può dimostrare immaginando che il vettore V_R diventi via via più piccolo (R via via più piccolo). Allora V (diagonale di un rettangolo che diventa via via più piatto) si dirige sempre più verso il basso e quando $V_R = 0$ ($R = 0$) si ha $V = V_C$ e il vettore è diretto perpendicolarmente verso il basso (come in fig. 29*b*). Se d'altra parte si fa diventare sempre più piccolo V_C, il vettore V si gira sempre più verso l'orizzontale fino a che per $V_C = 0$ esso viene a coincidere con V_R (fig. 29*a*).

Applicando il « teorema di Pitagora » si può calcolare la tensione risultante V note V_R e V_C e la resistenza in corrente alternata risultante (« *impedenza* ») note le resistenze e reattanze con le formule:

$$Z^2_{tot} = R^2 + X^2_C \qquad Z_{tot} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

In modo molto analogo si comporta una bobina in serie con una resistenza (fig. 34). In questo caso il vettore V_L e V sono diretti verso l'alto (o obliquamente verso l'alto). L'impedenza totale è:

$$Z^2_{tot} = R^2 + X^2_L \qquad Z_{tot} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

In questo caso come nel precedente moltiplicando l'impedenza Z per la corrente I, si ottiene solo il valore della tensione V e non la sua direzione.

Lo spostamento di fase fra la tensione V e la corrente I non è più 90° ma è meno (φ nelle fig. 33 e seguenti φ = lettera greca « fi ») perciò nel collegamento in serie di una resistenza e di una reattanza si assorbe una certa potenza

attiva. Il complesso dei due elementi si chiama « *impedenza* » od anche « *resistenza complessa* » per specificare che è composta di due parti distinte.

L'angolo δ (lettera greca « delta ») che corrisponde al complemento a 90° di φ (vedi fig. 33*b* e 34*b*), ha assunto una grande importanza nella radiotecnica. Quanto più esso è

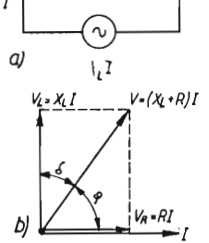


Fig. 34

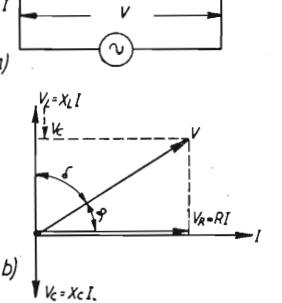


Fig. 35

grande tanto più piccolo diventa φ, cioè tanto maggiore è la resistenza ohmica in confronto alla reattanza induttiva o capacitiva e tanto maggiore è la potenza che va purtroppo perduta (si desidera infatti sempre che un condensatore od una bobina abbiano le minori perdite possibili). L'angolo δ è una misura della perdita dovuta a R perciò esso si chiama « *angolo di perdita* ». Esso dipende dal rapporto fra la resistenza e la reattanza. Poichè matematicamente il rapporto

$\frac{R}{X_C}$ o $\frac{R}{X_L}$ si chiama tg δ (tangente delta), si assume il

rapporto « *tangente delta* » come misura generale per indicare le perdite di un condensatore.

Nelle bobine è invece più frequentemente usato il rapporto

$$\frac{X_L}{R} = Q \text{ detto fattore di qualità della bobina.}$$

Consideriamo infine i circuiti risonanti con resistenza ohmica. Nella fig. 35 è rappresentato un circuito in cui si trovano in serie una resistenza (R) una induttanza (L) ed una capacità (C).

Attraverso tutti e tre gli elementi passa la stessa corrente I e la tensione totale è composta dalle tre tensioni parziali V_R, V_L e V_C. V_R è in fase con la corrente perciò il vettore corrispondente $V_R = I\,R$ è diretto verso destra. $V_L = X_L I$ è disegnato diretto verso l'alto e $V_C = X_C I$ verso il basso. Poi si sottrae V_C da V_L. La diagonale V del rettangolo che così si ottiene è la tensione totale ai capi del circuito risonante serie, φ è ancora l'angolo di fase e δ l'angolo di perdita. Se si fa ancora $X_L = X_C$, sintonizzando L e C per la frequenza di risonanza, le due reattanze si eliminano e la impedenza totale (e quindi anche la tensione totale) sono determinate solo dalla resistenza ohmica (la « *componente ohmica* »). L'angolo di fase diventa allora 0°. Si conclude quindi che un circuito risonante serie rappresenta un cortocircuito tanto più efficace quanto minore è la sua resistenza di perdita.

Se si collega bobina, condensatore e resistenza in parallelo alla tensione V, si possono disegnare in modo analogo a quello della fig. 32 le correnti per i singoli rami e si ottiene il diagramma della fig. 36*b* che, per quanto riguarda la posizione dei vettori I_L e I_C, corrisponde alla fig. 32*b*. In condizioni di risonanza si annulla la corrente del circuito di blocco formato da L e da C e resta solo quella che passa

attraverso la resistenza collegata in parallelo al circuito risonante (che può per esempio rappresentare la resistenza di isolamento del condensatore).

Lo sfasamento diventa in questo caso $\varphi = 0°$. Quanto più alto è R tanto maggiore è la resistenza di risonanza.

Invece di rappresentare tutte le perdite del circuito risonante parallelo con una resistenza R collegata in parallelo ,il che è in molti casi vantaggioso, si può impiegare spesso anche un'altro « *circuito equivalente* » nel quale si considera il condensatore come ideale e si assume come resistenza di perdita una resistenza r in serie con la bobina (fig. 37). La rappresentazione grafica di questo caso non sa-

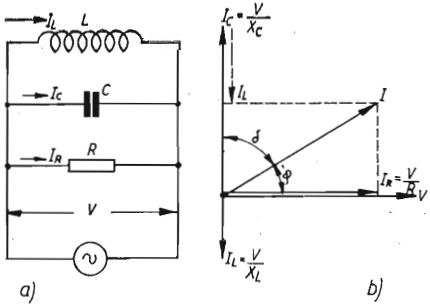


Fig. 36

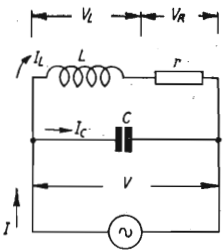


Fig. 37

rebbe molto chiara, perciò è da preferire il calcolo. L'impedenza del ramo con la bobina è uguale a $r + X_L$, quella del condensatore a X_C e poichè esse sono collegate in parallelo si deve impiegare la formula per la resistenza in parallelo date nella parte I.

Quindi per l'impedenza totale Z_{tot} dei due rami si ha:

$$Z_{tot} = \frac{(r + \omega L) \cdot \frac{1}{\omega C}}{(r + \omega L) + \frac{1}{\omega C}} = \frac{\frac{r}{\omega} + L}{rC + C\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

se si ricorda che ωL e $\frac{1}{\omega C}$ hanno direzioni opooste. Nel caso della risonanza si ha, come si è spesso ricordato, $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ e il secondo termine del denominatore della formula si annulla. In generale r è molto piccolo rispetto a ω (specialmente per le alte frequenze) in modo che si può trascurare anche il termine $\frac{r}{\omega}$. Si ottiene quindi una semplice formula per la resistenza di risonanza di un circuito risonante parallelo (fig. 37) $R_{ris} = \frac{L}{rC}$. Facciamo notare che r della fig. 37 e R della fig. 36 non sono affatto la stessa cosa.

Un circuito risonante (o la sua impedenza) non accordato si dice che è induttivo o capacitivo secondo che ha lo predominanza la componente induttiva o quella capacitiva.

Il circuito risonante oscilla

Finora si è supposto che il circuito risonante sia alimentato da un generatore di tensione alternata. Supponiamo invece di portare una certa carica al condensatore del circuito risonante della fig. 31. La tensione del condensatore ha allora un valore determinato ed in esso è immagazzinata una certa

energia che vorrebbe cedere. Perciò il condensatore comincia a scaricarsi attraverso la bobina e fa passare una corrente nelle sue spire. Questa crea un campo magnetico attorno alla bobina. Quando il condensatore è scaricato tutta la sua energia è passata al campo magnetico che ora comincia a distruggersi inviando al condensatore una corrente nel senso della corrente di scarica fino a che lo ha ricaricato alla tensione iniziale, perchè, non essendoci tensioni ohmiche, niente può andare perso. L'energia restituita dalla bobina viene rimmagazzinata dal condensatore e, quando esso è completamente ricaricato, comincia a scaricarsi una seconda volta attraverso la bobina per riformare in essa il campo magnetico e così via. Il gioco si ripeterebbe all'infinito se non ci fosse alcuna resistenza ohmica e in questo modo si sarebbe costruito il più semplice « *generatore di oscillazioni* ». La durata di un ciclo completo dell'energia dal condensatore, alla bobina, al condensatore nel senso opposto, alla bobina ed al condensatore nel senso primitivo dipende naturalmente dai valori della capacità e dell'induttanza ed infatti la frequenza con cui avvengono le oscillazioni è uguale alla frequenza di risonanza del circuito. Se nel circuito è presente una resistenza ohmica (*r* della fig. 37), ad ogni oscillazione della corrente una parte dell'energia va perduta in calore in questa resistenza.

Ad ogni ciclo l'ampiezza della corrente e della tensione diventano più piccole, fino a che alla fine tutta l'energia è stata consumata nella resistenza. La resistenza « smorza » le oscillazioni ed infatti le oscillazioni che si generano in un circuito oscillante con resistenza di perdita (quindi in tutti i circuiti oscillanti della pratica) si chiamano « *oscillazioni smorzate* » (fig. 38*b*) in contropposizione alle « *oscillazioni non smorzate* » del circuito ideale (fig. 38*a*).

Secondo che lo smorzamento è forte o debole si hanno delle oscillazioni molto o poco smorzate (fig. 39).

La « tangente delta » di una bobina o di un condensatore

ricordata più indietro si può indicare semplicemente anche come « *smorzamento* » (d_C o d_L) in modo che lo smorzamento di un circuito iscillante diventa $d = d_C + d_L$.

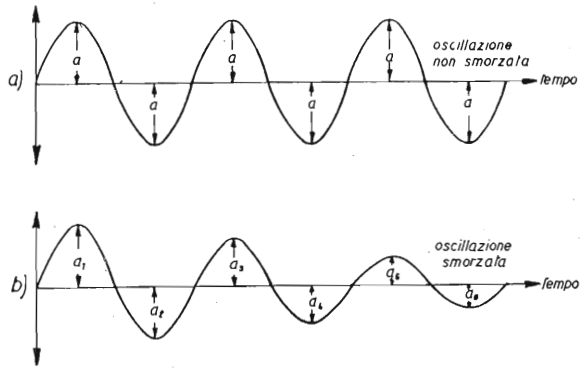


Fig. 38

Per poter mantenere costantemente in oscillazione un circuito, occorrerebbe ridargli all'inizio di ogni nuovo ciclo l'energia persa nell'ultimo, allo stesso modo che il peso o la molla di un orologio a pendolo forniscono ad ogni periodo l'energia perduta dal pendolo per l'attrito nell'aria e nei perni.

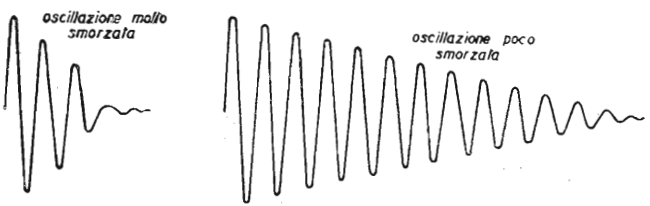


Fig. 39

L'attenuazione viene influenzata anche dal fatto che non ci sono mai delle reattanze puramente induttive o capacitive, perchè ogni condensatore a causa dell'avvolgimento delle armature o a causa dei, sia pur corti, terminali ha sempre una componente induttiva e ogni bobina ha una componente capacitiva a causa della capacità propria (fra le singole spire), e ciò indipendentemente dalla componente ohmica. Ci si sforza naturalmente di costruire dei condensatori a bassa induttanza e delle bobine a bassa capacità per tenere le componenti indesiderate le più piccole possibili.

La selettività

Nella radiotecnica si parla spesso di circuiti accordati più o meno smorzati o il che è lo stesso di maggiore o minore « selettività ». Si può chiarire bene questo concetto osservando la fig. 36*b*. Ci si deve solo mettere d'accordo su come indicare una determinata variazione della reattanza di un circuito risonante. Consideriamo nella fig. 36*b* il caso della risonanza, si ha che $I_C = I_L$, rimane solo la componente attiva I_R e φ s'annulla. Se si varia la sintonizzazione del circuito aumentando leggermente o la reattanza induttiva o quella capacitiva, il circuito è sintonizzato per un'altra frequenza, ma non più per quella che si stà considerando, esso non è più « accordato ». Il grado di « *disaccordo* » V verso l'una o l'altra parte può essere determinato da una variazione di C o di L. Se la capacità è minore di quella necessaria per la sintonia, allora passa atraverso il condensatore una corrente minore che non attraverso la bobina. Se si spinge il disaccordo tanto avanti da ottenere che la componente reattiva della corrente (nel nostro caso I_C o I_L) sia uguale alla componente attiva (I_R), il rettangolo si trasforma in un quadrato e poichè la sua diagonale è

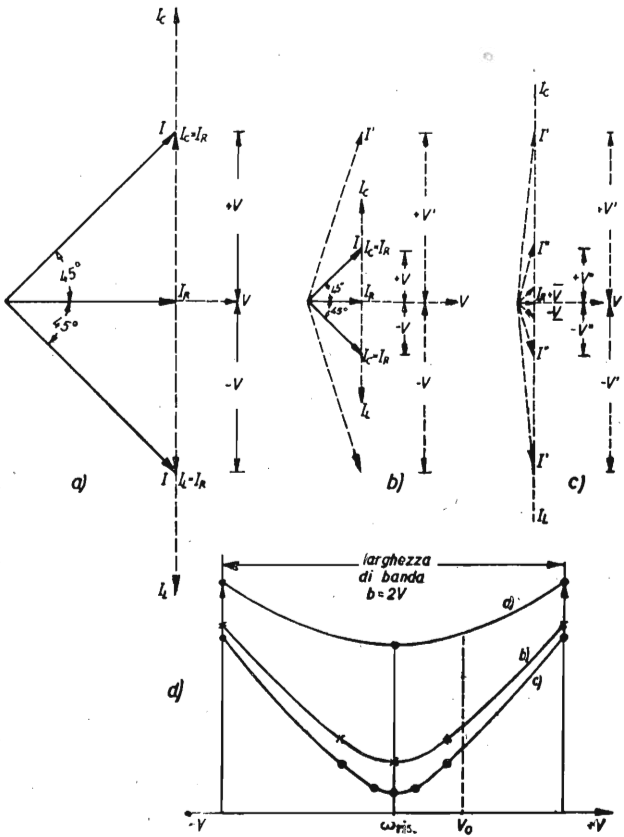


Fig. 40

1,41 volte il lato si ha che la corrente diventa 1,41 volte ($1{,}41 = \sqrt{2}$) il valore che aveva nel caso dell'accordo e che l'impedenza del circuito diventa 1/1,41 dell'impedenza di risonanza. Lo sfasamento diventa $\varphi = 45^\circ$ (disaccordo di 45°).

Nella fig. 40 sono rappresentate le diverse condizioni che si verificano con diversi valori della resistenza di smorzamento posta in parallelo al circuito. Nella fig. 40 il suo valore è relativamente piccolo, perciò passa attraverso ad essa una corrente I_R abbastanza elevata. Quindi è necessario un disaccordo molto forte per rendere I_C o — disaccordando dall'altra parte — I_L uguale a I_R. Nella fig. 40*b* il disaccordo necessario è molto minore perchè R è maggiore e I_R minore.

Si è segnata tratteggiata la corrente I' che si avrebbe con un disaccordo (V') uguale a quello della fig. 40*a*. Se per R si assume un valore maggiore ancora, I_R diventa più piccola ancora (fig. 40*c*) e il disaccordo per avere la condizione dei 45° è corrispondentemente più piccolo (⅓ di quello della fig. 40*b* e 1/10 di quello della fig 40*a*) Per confronto sono state disegnate le correnti I' e I'' che passarebbero attraverso il circuito nel caso di un accordo come quello della fig. 40*b* (V'') o della fig. 40*a* (V')' Per potere giudicare meglio l'effetto della variazione di R si è disegnato con lo stessa scala la corrente che si ha in tutti e tre i casi delle fig. 40*a*, *b*, *c* per i disaccordi che vanno da $+V$ a $-V$. Considerando un disaccordo qualsiasi V_r si vede che il circuito risonante distingue tanto più nettamente la frequenza di risonanza dalle altre (cioè è tanto più selettivo) quanto meno esso è smorzato. Si deve tener presente che le curve disegnate rappresentano le correnti, invece se si volessero rappresentare le impedenze le curve dovrebbero essere capovolte verso l'alto. Il valore doppio del disaccordo (inteso come variazione di frequenza) con il quale si ottiene o una corrente 1,41 volte maggiore o una impedenza 1/1,41 volte minore si chiama in radiotecnica: «*larghezza di banda*»

($b = 2V$). Se invece di una corrente 1,41 volte maggiore o di una impedenza 1/1,41 volte minore si parla di una corrente doppia e di una impedenza metà si ottiene la « larghezza al valore doppio » che non deve essere confusa con la larghezza di banda.

Spesso nelle pubblicazioni questi due concetti vengono confusi e si dice erroneamente che, quando l'impedenza di un circuito diventa la metà (risonanza parallelo) o quando l'impedenza diventa il doppio (risonanza serie), il valore doppio del disaccordo relativo è uguale alla larghezza di banda. E' giusto invece dire: *quando l'impedenza di un circuito risonante parallelo scende a* 1/1,41 *volte e quando l'impedenza di un circuito risonante serie diventa* 1,41 *volte, il disaccordo misurato* (*variazione di frequenza necessaria per ottenere ciò*) *è uguale a metà della larghezza di banda.*

Nella pratica della tecnica radio i circuiti oscillanti più impiegati sono quelli della parte in alta frequenza dei ricevitori. Per misurarli si può procedere nel modo seguente: si applica al ricevitore (entrata) una determinata frequenza uguale alla frequenza di risonanza del o dei circuiti e si misura la tensione ai capi del circuito in esame. Se ora si varia la frequenza applicata per es. di 9000 Hz, allora si deve aumentare la tensione applicata al ricevitore per avere la stessa tensione sul circuito. Il rapporto fra le due tensioni dà una idea della selettività del circuito, perchè quanto più forte è questo rapporto tanto meno è sentito il disturbo di una frequenza non desiderata vicina a quella di risonanza. Infatti, come si può vedere da qualsiasi programma radio, i vari trasmettitori hanno delle differenze di frequenza di circa 9000 Hz (qualche volta anche meno) in modo che il valore consigliato è ben adatto alla pratica.

Il sistema di rappresentazione per le grandezze alternate si chiama oltre che « vettoriale » anche « simbolico ». Uno schema come quello della fig. 40 si chiama « diagramma vettoriale » e nella composizione dei vettori si parla di

« somma dei vettori ». Nella letteratura i vettori vengono di solito rappresentati o con dei caratteri in grassetto o con delle lettere con una lineetta sopra.

Un filo rettilineo come circuito oscillante

Noi abbiamo visto finora dei circuiti oscillanti costituiti da una bobina, un condensatore ed eventualmente una resistenza e non avremmo mai pensato che un filo isolato e teso in un posto qualsiasi potesse essere un circuito oscillante. Cerchiamo di rivedere ancora cosa avviene in un circuito oscillante. Noi portiamo una certa quantità di elettroni su una armatura del condensatore, cioè carichiamo il condensatore, lo mettiamo in tensione.

Fra le due armature del condensatore si crea allora una condizione particolare che noi chiameremo « *campo elettrico* », ci sono delle « linee di forza » ortogonali alle armature che vanno da un'armatura all'altra. Se con la bobina si crea un collegamento conduttore fra le due armature, il campo elettrico si « annulla », perchè attraverso la bobina passeranno tanti elettroni quanti sono quelli necessari a ristabilire l'equilibrio, cioè ad avere lo stesso numero di elettroni sulle due piastre. Però questi elettroni passando attraverso la bobina sotto forma di corrente elettrica creano, a causa della sua autoinduzione, un « *campo magnetico* » che continua a crescere fino al momento in cui il condensatore si scarica. Dopo però non è più possibile mantenere costante il campo magnetico ed esso comincia a diminuire. Nasce allora una f.e.m. contraria a quella precedente che tende a mantenere in movimento gli elettroni ed infatti essa gli invia a quella armatura del condensatore che prima ne aveva in difetto. Il condensatore si carica quindi un'altra volta, però con una tensione opposta a quella precedente.

Il gioco si ripete continuamente e poichè questo fenomeno periodico, in cui l'energia elettrica si trasforma alternativamente in energia magnetica ed in energia elettrostatica, avviene sempre in presenza di resistenze ohmiche inserite nel circuito, una certa quantità di energia « va perduta » (viene trasformata in un'altra forma di energia: calore), l'oscillazione viene via via smorzata ed alla fine si ferma completamente, a meno che nel frattempo non si abbia ricaricato il condensatore.

Le possibilità di passare energia da un circuito oscillante ad un'altro sono due. Nella fig. 41*a* è schematicamente

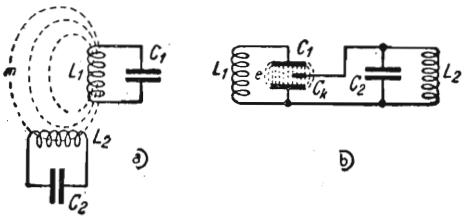


Fig. 41

rappresentato l'accoppiamento magnetico, a noi già noto, che viene effettuato dalle linee di forza della bobina L_1. Queste linee di forza magnetiche del primo circuito (L_1 C_1) incontrano in parte la bobina L_2 del secondo circuito (L_2 C_2), perciò si induce in essa una tensione e anche il secondo circuito può oscillare. C'è però anche un'altra possibilità che permette di trasmettere dell'energia da un circuito ad un'altro. Se si inserisce fra le piastre di un condensatore (C_1 della fig. 41*b*) una terza piastra che sia collegata al secondo circuito, essa viene a trovarsi immersa nel campo elettrico di C_1 e gli elettroni sulle armature di questo conden-

satore metteranno in movimento anche gli elettroni della terza piastra. Questa nuova piastra ha una certa capacità rispetto alle piastre del condensatore C_1, essa si chiama « *capacità di accoppiamento* » C_k) (« accoppiamento capacitivo »).

Queste possibilità di trasmissione sono indipendenti dalle dimensioni delle bobine e dei condensatori che possono essere grandi o piccoli, ma in ogni caso il campo delle linee di forza magnetiche od elettriche è relativamente molto limitato. Ad una certa distanza dal circuito oscillante esse non hanno praticamente alcuna influenza su un altro circuito oscillante. Ciò è dovuto al fatto che le linee di forza sono strettamente concatenate con il circuito (« *circuito oscillante chiuso* ») (fig. 42*a*). Noi possiamo però allontanare

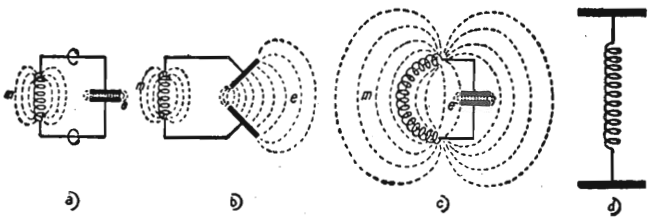


Fig. 42

le armature del condensatore (fig. 42*b*), allora il campo elettrico *e* si estende di più. Se noi aumentiamo di molto oltre che la distanza fra le armature anche la loro superficie, in modo da non variare la capacità e quindi la frequenza di risonanza del circuito, si ottiene una maggiore estensione del campo del circuito, che pur rimane del tipo di quella della fig. 42*a*, e che può ora essere accoppiato con un altro circuito lontano da esso. Allo stesso modo, aumentando le

dimensioni della bobina (fig. 42*c*), si può estendere ad una maggiore distanza l'effetto del campo magnetico *m*. E' assolutamente indifferente il posto in cui noi mettiamo le armature del condensatore, noi possiamo metterle anche alle estremità di una lunga bobina (fig. 42*d*). Anche in questo caso gli elettroni oscilleranno dall'una all'altra piastra e precisamente dall'alto al basso, dal basso all'alto e così via.

Le linee di forza del condensatore non riescono a chiudersi completamente su questa lunga distanza ed anche le linee magnetiche che escono dalla bobina e che sono perpendicolari alle prime di irradiano a grande distanza.

In questo « *circuito oscillante aperto* » noi notiamo sopratutto la proprietà caratteristica della netta separazione fra corrente e tensione. Nel circuito oscillante chiuso con le sue piccole dimensioni la corrente in un determinato istante è uguale in tutti i punti del circuito, invece in questa bobina allungata osserviamo che l'intensità di corrente (quantità di elettroni che si muovono da una armatura all'altra) è massima (*ventre di corrente*) al centro della bobina e poi diminuisce fino ad annullarsi (*nodo di corrente*) in corrispondenza delle piastre. Invece la tensione (numero di elettroni fermi ed accumulati) è massima (*ventre di tensione*) in corrispondenza delle armature ma a metà strada fra loro, cioè dove c'è un ventre di corrente si trova una tensione nulla (*nodo di tensione*).

Se si diminuiscono sempre più le dimensioni delle armature, per mantenere costante la frequenza di risonanza, occorre aumentare la bobina.

Alla fine si possono dimenticare addirittura le piastre e costruire la bobina con un solo filo lungo e diritto. Ciascun tratto di questo filo ha — come del resto ogni spira di una bobina rispetto alle altre — una certa capacità rispetto agli altri tratti di filo (grande con quelli vicini e piccola con quelli lontani). Questa è la cosidetta « *capacità propria* » o « *capacità distribuita* ».

Inoltre le linee di forza che si generano per la corrente che passa in un tratto di filo inducono una f.e.m. nei tratti di filo vicini, il filo si comporta quindi come un circuito oscillante e precisamente come un circuito oscillante aperto con la sua caratteristica separazione fra corrente e tensione (fig. 43). Anche sul filo teso la distribuzione della corrente e della tensione è quella già determinata (fig. 43) Poichè in un tale circuito (fig. 44) si trova la metà di una oscilla-

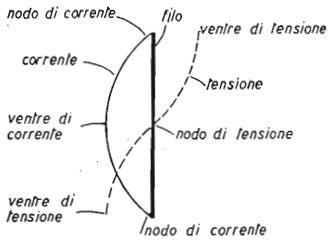


Fig. 43

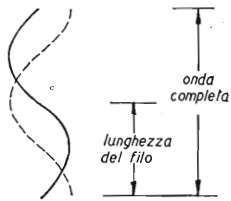


Fig. 44

zione completa e poichè un circuito oscillante aperto si chiama anche « *dipolo* », si parla in questo caso di « *dipolo a mezza lunghezza d'onda* ».

I circuiti oscillanti aperti si chiamano in generale « *antenne* » (in questo caso « *antenne a mezza lunghezza d'onda* »).

Come succede se si fa il filo lungo quanto una lunghezza d'onda? (fig. 44).

Anche in questo caso ci saranno alle estremità dei ventri di tensione, lungo il filo si troverà al centro un altro ventre di tensione e ai suoi lati due ventri di corrente. Si ottiene sempre un circuito oscillante anche allungando il filo di 1/2, 3/2 di lunghezza d'onda. Ed infatti partendo dal dipolo (fig. 45*a*) si può costruire un *dipolo ad onda intera* (fig. 45*b*)

un *dipolo a tre mezze lunghezze d'onda* (fig. 45*c*) ecc, oppure si può dire in altre parole che un filo diritto può oscillare sia su mezza lunghezza d'onda che su due, tre, quattro lunghezze d'onda (fig. 46). Sotto questo aspetto esiste una differenza fondamentale fra il circuito oscillante chiuso e quello aperto, infatti il primo può oscillare solo su una frequenza (*fondamentale*) invece quello aperto può oscillare su una frequenza e sui suoi multipli (*armoniche*).

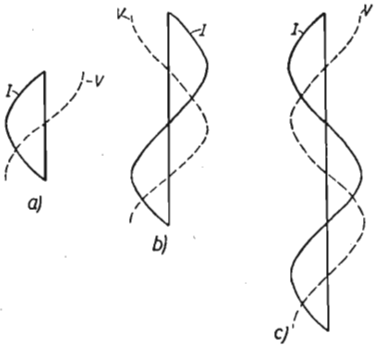


Fig. 45

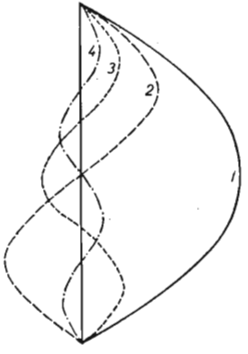


Fig. 46

L. 550